

Optimering av sotningsfrekvens i biobränsleeldad CFB-panna – Panna 5, Mälarenergi AB, Västerås

*Soot frequency optimization in a bio fuelled CFB-
boiler
– Boiler 5, Mälarenergi AB, Västerås*

Anna Pettersson

Abstract

Optimering av sotningsfrekvens i biobränsleeldad
CFB-panna – Panna 5, Mälarenergi AB, Västerås
**Soot frequency optimization in a bio fuelled
CFB-boiler – Boiler 5, Mälarenergi AB, Västerås**

Anna Pettersson

During the past 30 years the fuels for energy production in heating and power plants have changed. Fossil fuels have decreased in usage whereas bio fuels in Sweden have increased with 60% since the 1970's. Different fuels affects combustion and the release of various substances and particles into the flue gas. This is caused by the diverse components and chemical structures of fossil fuels and bio fuels. When the flue gas leave the combustion chamber and enters the path to the chimney particles in the gas are being transported out of the combustion chamber. When particles encounter surfaces either a reaction between the particles and the materials of the surface takes place or a new layer builds on top of the surface. These layers of particles decrease the efficiency of the boiler. In order to remove the particles from the surfaces through which heat is being transferred different soot methods are used. One of the common soot methods is soot blowing, where hot steam is blown through a nozzle causing the layers to crack and remove from the surfaces.

The purpose of this work was to optimise the soot blower frequency in boiler 5, Mälarenergi AB, in Västerås, Sweden. Boiler 5 is a CFB-boiler with bio fuel combustion. Today different soot intervals are used. The interval frequency is of importance to the growth rate of the layer on the surfaces.

Data from a period of six months were studied in order to conclude when and where in the boiler the soot blowers were active and cleaning. The results were analyzed and compared to measurements of heat transfer through the surfaces. In the supra heaters the most commonly used interval was intervals of 24 hours, and in economiser and in the air pre heater intervals of 8 hours was more common. Calculations and comparisons show that an increase of soot frequency from 24 hour intervals to 8 hour intervals in the supra heaters is profitable. The results from the economiser and the air pre heater have not been conclusive since there is lot of fluctuations in the measurement that affect the results. In order to conclude the optimal cleaning interval for economiser and air pre heater more studies are acquired.

Handledare: Erik Holmén
Ämnesgranskare: Tatjana Stern
Examinator: Bengt Hillring

Sammanfattning

Bränsleanvändningen i energiproduktion i Sverige har förändrats sedan 1970-talet, användningen av biobränslen har ökat med nära 60 % vilket medfört att de traditionella fossila bränslena såsom olja och kol minskat i användning. Fossila bränslen och biobränslen skiljer sig åt i uppbyggnad och kemisk sammansättning. Detta medför bland annat att andra föreningar och partiklar frigörs vid förbränning av fossila bränslen jämfört med förbränning av biobränslen.

Vid förbränningen frigörs partiklar och ämnen ur bränslet och förs med rökgaserna ut ur eldstaden, på ytor där kan partiklar och ämnen bilda beläggningar. Beläggningarna bildar ett lager på ytorna och minskar därmed värmeöverföringen genom ytorna, hur stor minskningen är beror på beläggningens egenskaper och tjocklek. I pannan finns tubrör genom tubrörens väggar sker värmeöverföring från de heta rökgaserna utanför till mediet som strömmar inne i tubrören. Beroende på var i pannan tubrören är placerade är mediet vatten, luft eller ånga. God värmeöverföring genom väggarna till tubrören är viktigt för att hög verkningsgrad ska kunna nås. För att rengöra tubrörens ytor då pannan är i drift används olika typer av sotningsmetoder. För effektiv rengöring är det viktigt att sotningsutrustning och metod är anpassad till de beläggningar som uppstår på ytorna. Vid förbränning av biobränslen bildas andra typer av beläggningar än vid förbränning av fossila bränslen. Sotningsmetodens effektivitet beror på hur väl den är anpassad till de bränslen som används och de beläggningar som uppstår i pannan. Genom att optimera rengöringen av de ytor där värmeutbyte sker kan verkningsgraden på pannan bli bättre.

Sotningens intervall är av betydelse för hur mycket beläggningar som hinner bildas på ytorna mellan rengöringstillfällena. Syftet är att optimera sotningsintervallen för Mälarenergi panna 5 i Västerås. Panna 5 är en biobränsleeldad CFB-panna. Panna 5 togs i drift år 2001 och är den nyaste pannan på kraftvärmeverket. Sotningssystemet som används i panna 5 är ångsotning, 32 stycken sotblåsare är placerade ovanför de värmeöverförande ytorna.

Driftdata för en period på 6 månader studeras för att analysera hur värmeöverföringen påverkas av tiden mellan sotningarna studeras, samt jämföra detta med rengöringseffekten vid olika sotningsintervall. Tyngdpunkten i arbetet har lagts på att studera när, hur och var sotningen sker i pannan, vilka sotningsintervall som använts samt förbrukningen av sotningsånga vid sotningstillfällena, då kunskap om detta behövs för att vidare analys av påverkan från sotningen och sotningsintervallen på värmeöverföring och effekt i pannans olika delar ska kunna göras.

I överhettarna har de vanligaste sotningsintervallen varit 24 timmars intervall, både mer och mindre täta sotningsintervall förekommer. I luftförvärmare och ekonomiser var de vanligaste sotningsintervallen under perioden 8 timmars intervall. De trender som har kunnat ses är att täta sotningsintervall medför en ökning av värmeöverföringen i överhettarna, en ökning av sotningsfrekvensen är lönsam i överhettarna. Resultaten för luftförvärmare och ekonomiser är inte lika tydliga, under perioden har sotningsintervallen varit tätare och jämförelser med längre sotningsintervall har varit svåra att genomföra.

För att avgöra hur täta sotningsintervall som kan användas måste en avvägning mellan ökning i värmeöverföring, kostnad för sotningsånga samt ökningen av påfrestningen för materialet i tubrören göras. I överhettarna visar analyserna på att en ökad sotningsfrekvens är lönsam, den

ökade kostnaden för sotningsånga är betydligt lägre än den möjliga vinst som kan fås vid tätare sotningsintervall.

Slutsatsen är att det är lönsamt med ett tätare sotningsintervall i överhettarna såvida det inte leder till ökat slitage av ytorna i pannan. I och med att effektuttaget och värmeöverföringen kan hållas på en högre nivå under en längre tidsperiod.

Som förslag på fortsättning föreslås följande:

- Utför sotning med 8 timmars sotningsintervall i överhettarna för att under en längre period kunna se hur trenden på värmeöverföringen förändras jämfört med perioder då sotningsintervallen är kring 24 timmar.
 - Utvärdera hur tätare sotningsintervall kan påverka slitage i överhettarna, hur påverkas erosions- samt korrosionspåfrestningar i materialet då sotning sker med tätare intervall.
 - Sota under samma period ECO och LUFÖ med sotningsintervall på 8 timmar för att avgöra överhettarnas påverkan på värmeöverföringen i de nedre delarna.
- Studera hur bränsleblandningen påverkar värmeöverföring och beläggingsbildning. Medför en viss bränslemix ökad eller minskad sotning?
- Utvärdera möjligheten till att använda akustisk sotning som komplement till den befintliga ångsotningen.
- Mät och logga tidpunkten för sotningssekvensens start. Detta medför att mer exakta beräkningar för sotningstider och därmed även förbrukningar skulle kunna erhållas.
- Studera även andra parametrar som kan ha betydelse för sotblåsningens effektivitet, som dysornas vinklar eller sotblåsarens hastighet.
- Om tätare sotningsintervall leder till ett för stort slitage på ytor inne i pannan, kan lägre tryck på sotningsångan vara önskvärt. Det blir då intressant att undersöka dysöppningens vidd för att erhålla ett önskvärt tryck och spridning på ångan. Att använda sotningssekvenser med färre sotblåsare så att varannan gång sotas hälften av sotblåsarna kan även minska slitaget på pannans ytor.

Förord

Initiativtagare till examensarbetet var Mälarenergi AB, i Västerås. Examensarbetet är utfört under våren 2007, för Mälarenergi AB, på kraftvärmeverket i Västerås och för institutionen för bioenergi vid Sveriges lantbruksuniversitet i Uppsala. Omfattningen av examensarbetet är 20 poäng (eller 30 poäng i nya systemet).

Jag vill gärna passa på att tacka alla som varit delaktiga och hjälpt mig på Mälarenergi AB, kraftvärmeverket i Västerås, Uppsala Universitet, Sveriges Lantbruksuniversitet med flera. Ett stort tack till alla på avdelningen teknik och avräkning, för det trevliga bemötandet och all hjälp under våren.

Jag vill särskilt tacka min handledare Erik Holmén och min ämnesgranskare Tatjana Stern som ställt upp med förklaringar och svar till alla frågor och funderingar som dykt upp under arbetets gång. Ett stort tack riktas även till Fredrik Ölvebo som hjälpt till med förklaringar och visningar av pannan.

Uppsala, mars 2008
Anna Pettersson

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	5
1.1	SYFTE	7
1.2	GENOMFÖRANDE	8
1.3	RAPPORTENS UPPDELNING.....	9
2	TEORI.....	11
2.1	BIOBRÄNSLEN.....	11
2.2	VÄRMEÖVERFÖRING	13
2.3	BELÄGGNINGAR.....	17
2.4	SOTNING	19
3	BESKRIVNING AV PANNA 5, MÄLARENERGI AB.....	26
3.1	KRAFTVÄRMEVERKET I VÄSTERÅS	26
3.2	PANNA 5	27
3.3	SOTNINGSSYSTEMET I PANNA 5	32
4	RESULTAT	35
4.1	STUDERADE MÄTVÄRDEN	35
4.2	STATISTIK FÖR SOTNING	36
4.3	BERÄKNING AV KOSTNAD FÖR SOTNING	38
4.4	DRIFTDATA	41
4.5	SOTNINGSTEST.....	49
4.6	BETYDELSEN AV SOTNING OCH SOTNINGSINTERVALL	50
5	AVSLUTANDE DISKUSSION	64
5.1	SOTNINGSINTERVALLETS BETYDELSE FÖR VÄRMEÖVERFÖRINGEN	64
5.2	FELKÄLLOR	65
6	SLUTSATSER.....	67
7	REFERENSER	69
	BILAGOR.....	71
BILAGA A	SAMBAND FÖR VÄRMEÖVERFÖRING	71
BILAGA B	BRÄNSLESTATISTIK I PANNA 5	74
BILAGA C	SOTNINGSSTATISTIK.....	75

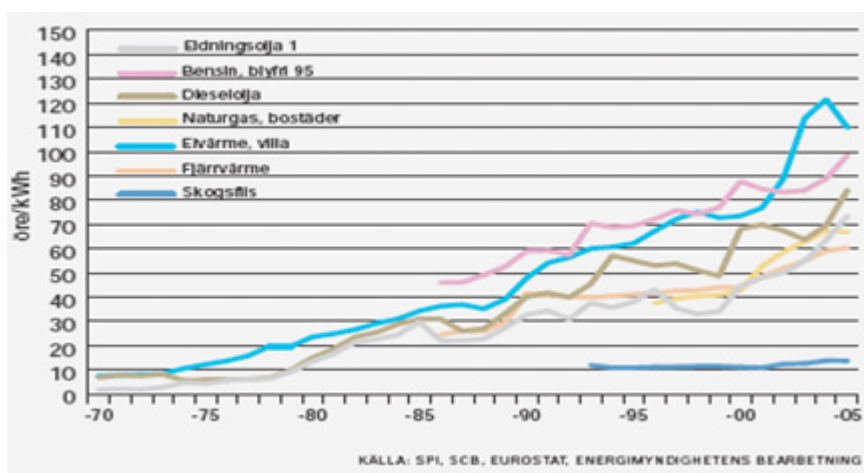
1 Inledning

Biobränslen är förnybara och koldioxidneutrala bränslen. Förbränning av biobränslen medför inte något tillskott av koldioxid till atmosfären i och med att biobränslen ingår naturligt i biosfären. De uppväxande biobränslena fångar genom fotosyntes upp och lagrar koldioxid. Vid god återväxt blir tillväxten och därmed uppfångningen av koldioxid lika stor som uttaget och nivån kan hållas konstant. Om biobränslena istället för att förbrännas skulle brytas ned naturligt skulle samma mängd koldioxid frigöras, dock med en förskjutning på biomassans återstående livslängd. Förbränning av fossila bränslen däremot frigör koldioxid som varit ur cirkulation under flera miljoner år. Detta ökar på halten av koldioxid i atmosfären. Växande intresse för klimatfrågor och minskning av växthusgaser som koldioxid leder till ökat intresse för biobränslen. Teknisk utveckling möjliggör energiproduktion med biobränslen samtidigt som ökat intresse i klimatfrågor ger mer satsningar på förnyelsebara energikällor.

”Arbetet för att öka användningen av biobränsle är en viktig del av strategin för att uppnå god naturresurshushållning och är även en del i klimatarbetet”
(Energimyndigheten, 2007)

Detta syns inte minst på att användningen av och intresset för biobränslen vid både kraft- och värmeproduktion har ökat de senaste årtiondena. Biobränsleanvändningen i energiproduktion i Sverige har ökat sedan 1970-talet. Idag utgör biobränslen nära 20 % utav Sveriges totala primärenergianvändning. År 2005 uppgick Sveriges totala energitillförsel till 630 TWh, varav 100 TWh kommer från biobränslen. (Energimyndigheten, 2007) (IEA Bioenergy, 2007).

För att främja användningen av biobränslen och öka konkurrenskraften på bränslemarknaden används styrmedel i form av koldioxidskatter och el-certifikat för att fördyra användandet av fossila bränslen. Styrmedel påverkar priser för bränslen, så att fossila bränslena blir dyrare att använda än koldioxidneutrala biobränslen. På detta vis blir biobränslen mer fördelaktigt på energimarknaden. I Figur 1-1 kan utvecklingen för energipriserna från 1970 fram till 2005 ses. I takt med att energipriserna stiger ökar kraven på att optimera anläggningarna och hålla nere produktionskostnaderna. Ökande bränslepriser medför högre krav på att få ut mycket energi per mängd bränsle.

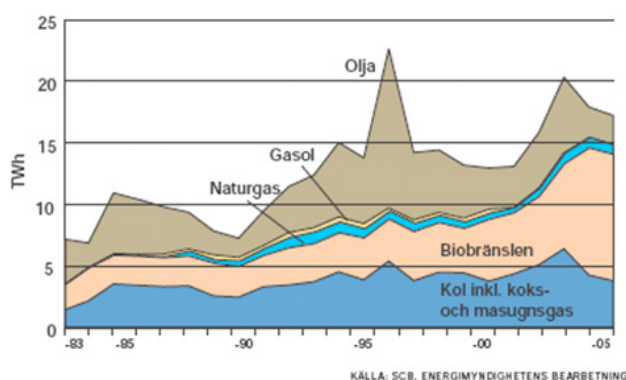


Figur 1-1: Löpande kommersiella energipriser i Sverige 1970-2005. (Energimyndigheten, 2007)

År 2003 infördes ett el-certifikatsystem för att främja utbyggnaden av förnybar elproduktion i Sverige. Syftet är att öka elproduktionen från förnybara energikällor (som biobränslen) med

10 TWh från 2002 till 2010. Producenterna av förnybar el säljer el-certifikat och får kapital vilket minskar kostnaden för elproduktionen och ökar verksamhetens lönsamhet. Systemet fungerar så att samtliga producenter av förnyelsebar el får ett el-certifikat per MWh el som produceras. Samtliga¹ elkonsumenter är kvotpliktiga, dvs. skyldiga att köpa el-certifikat. Kvotplikten avses att öka varje år för att påverka utbyggnaden av förnybara energikällor positivt genom att efterfrågan på el-certifikat ökar.

Sveriges användning av olika bränslen för elproduktion visas i Figur 1-2. Användning av kärnbränslen är ej med i figuren, vilket medför att diagrammet visar elproduktion från kraftvärme²- och kondenskraftverk³. Mindre el kan produceras i kraftvärmeverk jämfört med kondenskraftverk, den energi som kyls bort som spillvärme i kondenskraftverk kan användas för att producera fjärrvärme i kraftvärmeverk. Mer energi kan utvinnas ur bränslet i kraftvärmeverk, de har därmed en högre verkningsgrad.



Figur 1-2: Insatt bränsle för elproduktion (exkl. kärnbränsle) 1983-2005 (Energimyndigheten, 2007)

Den totala bränsleanvändningen har ökat rejält under perioden, från 8 TWh till nära 17 TWh. Figur 1-2 visar även att fördelningen av använt bränsle har förändrats. I början av 1980-talet stod fossila bränslen för den största andelen bränslen, biobränslen utgjorde knappt en tredjedel. I dag är förhållandena omvända, av den totala bränsleanvändningen till elproduktion år 2005 stod biobränslen för 60 % medan olja och kol endast utgjorde 5 % respektive 22 %.

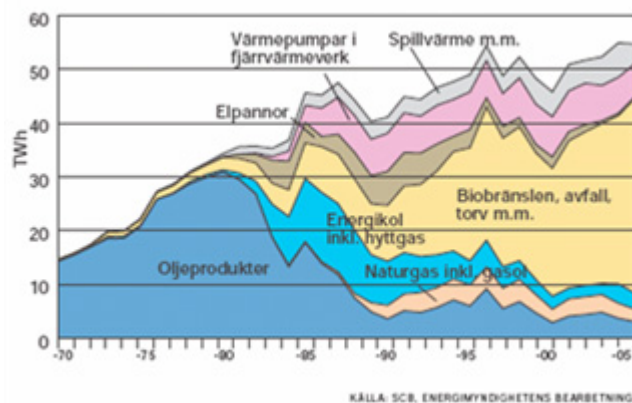
Användningen av bränslen för hetvattenproduktion till fjärrvärme i värmeverk⁴ eller kraftvärmeverk har förändrats markant sedan 1970-talet. Figur 1-3 visar förändringen av bränsleanvändning för fjärrvärmeproduktion från 1970 fram till 2005. Från att främst använda olja för värmeproduktion på 1970-talet till den stora variation av bränslen som används idag, där olja står för knappt 5 %. Biobränslen är idag det mest använda bränslet för värmeproduktion i Sverige.

¹ Undantag finns

² Kraftvärmeverk producerar både el och fjärrvärme

³ I kondenskraftverk sker enbart elproduktion, värmeöverskottet kyls bort som spillvärme.

⁴ Värmeverk producerar enbart hetvatten till fjärrvärmenät



Figur 1-3: Tillförd energi i fjärrvärme 1970-2005. (Energimyndigheten, 2007)

Nya bränslen medför förändringar och ställer nya krav på utrustning och teknik vid förbränningen och produktionen i stort. Vid förbränning frigörs partiklar och föreningar ur bränslet. Förbränning av biobränslen och avfallsbränslen frigör andra ämnen och föreningar inne i pannan än vid förbränning med fossila bränslen. Detta leder till att nya typer av beläggningar bildas på ytorna i pannan. Förändringen av bränslen och beläggningstillväxt leder till att förändrad rengöring kan behövas för att värmeöverföringen ska fungera bra. Mer om biobränslen och beläggningar i kapitel 2.3. På värmeöverförande ytor bildas beläggningar av partiklar och föreningar i rökgaserna från förbränningen. God värmeöverföring mellan rökgaser och ånga är viktigt för att bra verkningsgrad ska kunna nås. Hur väl värme kan överföras beror på den mellanliggande ytans värmeöverföringsförmåga, dess U-värde. U-värdet beror på ytans tjocklek samt materialets förmåga att leda värme. När beläggningar byggs på ytan minskar värmeöverföringen genom ytan, förändringen beror på beläggningens egenskaper och tjocklek.

För att rengöra ytorna inne i rökgasstråket används olika sotningsmetoder. Genom att optimera rengöringen av de ytor där värmeutbyte mellan ånga och rökgaser sker kan värmeöverföringen bli bättre. För att rengöringen ska vara effektiv är det viktigt att utrustningen är anpassad till de typer av beläggningar som bildas. Är beläggningarna lösa och omfattande är det lämpligt att använda akustisk sotning. Är de däremot hårda kan mer kraftfulla sotningsmetoder behövas då kan sotning med ånga vara lämplig. Intervallet mellan sotningar har betydelse för hur mycket beläggningar som hinner bildas innan nästa sotning, dvs. hur mycket värmeöverföringen minskar. Vid frekvent sotning kan erosions- och korrosionsskador uppstå på värmeöverförande ytor⁵ inne i pannan, det är viktigt att förändring i sotning sker med försiktighet.

1.1 Syfte

Syftet med examensarbetet är att optimera sotningsintervallen för Mälarenergi panna 5 i Västerås. Panna 5 är den nyaste pannan på kraftvärmeverket, togs i drift 2001. Panna 5 är en CFB-panna⁶ på 157 MW, avsedd för el och värmeproduktion genom förbränning av biobränslen. Beskrivning av panna 5s uppbyggnad och sotningssystem görs närmare i kapitel 3. Arbetet innehåller statistik på hur sotningen sker i panna 5, samt beräkningar av kostnaden för sotningsånga vid sotning.

⁵ Mer beskrivning av de värmeöverförande ytorna i kapitel 2

⁶ CFB står för cirkulerande fluidiserande bädd, beskrivs närmare vid beskrivning av panna 5 i kapitel 3.

Detta examensarbete kommer att beröra hur värmeöverföringen genom ytorna i rökgasstråket påverkas av sotning. Kostnaden för sotningen i panna 5 beräknas och jämförs med effekten från sotningen vid olika sotningsintervall. Målet är att se hur sotningsfrekvensen påverkar kostnaden för sotningen och värmeöverföringen i panna 5.

1.2 Genomförande

Litteraturstudie på värmeöverföring, sotningsmetoder samt utformning och uppbyggnad av värmeöverförande ytor i fastbränslepannor har genomförts. I samband med litteraturstudien har fokus lagts på biobränslepannor, i och med att syftet med examensarbetet är att optimera sotningen på en biobränsleeldad CFB-panna.

För att skapa förståelse för hur panna 5 är uppbyggd och hur sotningssystemet fungerar har tidigare utförda arbeten i panna 5 studerats samt intervjuer med driftpersonal på kraftvärmeverket. Framförallt Erik Holmén och Fredrik Ölvebo som visat runt i pannhuset, svarat på frågor och funderingar kring sotning och värmeöverföring. I april fanns även tillfälle att studera pannan invändigt då den togs ur drift ett par dagar.

Fokus i arbetet har lagts på att studera driftdata före, efter och då sotning sker i panna 5, samt att ta fram statistik på hur många sotningar som utförts och mängden av ånga som förbrukats vid sotningarna. Driftdata för panna 5 under en period på 6 månader har studerats från 24 september 2006 till 30 april 2007. Följande data har analyserats:

- Sotningsintervall under den studerade perioden.
- Sotningstider för de enskilda sotblåsarna
- Ångförbrukning i genomsnitt för varje sotblåsare, del och för pannan totalt.

Excel har använts för att studera och sortera mätvärden. För att beräkna tiden mellan sotningarna, hur förändring av värmeöverföring sker har makron konstruerats i Visual Basic. Visual Basic har även använts till att sortera mätvärdena.

1.2.1 Avgränsningar

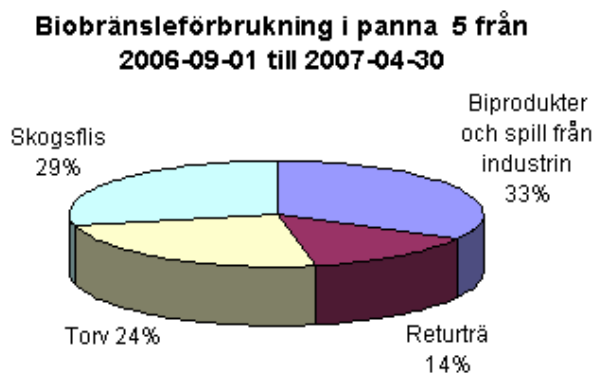
De sotningsmetoder som studeras är metoder för att rengöra de värmeöverförande ytorna i rökgasstråket då pannan är i drift. Sotningsmetoder som utförs då pannan är ur drift (vid revision eller stillastående) studeras ej. I panna 5 används ångsotning för att rengöra ytorna, därmed har fokus lagts på beskrivning av denna sotningsmetod.

För att analysera data för likvärdiga förhållanden har data studerats för vanligaste driftfallet för panna 5, vilket är full last. De värmeöverförande ytor som sotas i panna 5 är de som är placerade i rökgasstråket. De värmeöverförande ytor som inte sotas kommer inte att studeras närmare i detta examensarbete. Vid minskad värmeöverföring i en del av pannan blir rökgaserna efter denna del varmare, vilket leder till större värmeöverföring i ytor placerade längre ner (bak) i rökgasstråket. Pannan kompenserar på detta vis för en viss värmeöverföringsminskning. Detta komplicerar studierna för sotningens påverkan på värmeöverföring och effekt, i och med att ökad värmeöverföring kan bero på varmare rökgaser. För att studera hur sotningen sker i de olika delarna och hur sotningen påverkar värmeupptagningen studeras de olika värmeöverförande ytorna var för sig.

För att avgöra lämpliga sotningsintervall är det främst den kortsiktiga effekten från sotningen som studerats, samt hur sotningen påverkar värmeöverföringen mellan sotningsintervallen.

Hur värmeöverföringen och effekten påverkas vid sotning har studerats vid tillfällen då sotningen har skett med olika tidsintervall. Bränsleblandningen varierar över året beroende på tillgång och bränslepriser, för att få en jämn förbränning blandas vanligen olika bränslen. Bränsleblandningen eller bränslereceptet anges i antalet skopor av ett visst bränsle som ska lastas i silon. Hur bränslet blandas varierar dels genom att blandning sker i den silo bränslet förvaras i innan pannan men även då måttet ”en skopa” kan variera något från skopa till skopa.

Bränslerecepten väljs dels beroende på vilka bränslen som finns hemma, bränslepriser och för att ge bra och jämn förbränning i pannan. Under den studerade perioden har följande bränslen förbränts skogsflis, biprodukter och spill från industrin, returträ och torv. Fördelningen kan även ses i Figur 1-4.



Figur 1-4: Fördelning av biobränsleanvändningen i panna 5.

I Bilaga B Bränslestatistik i panna 5 visas bränslestatistik från perioden. Variationer förekommer men hur dessa påverkar variationen i uppbyggnaden av beläggningar tas inte upp närmare i detta examensarbete.

1.3 Rapportens uppdelning

1.3.1.1 Kapitel 2 Teori

Teori kapitlet ger bakgrund kring biobränslen, värmeöverföring, beläggningar och sotningsmetoder som används.

1.3.1.2 Kapitel 3 Beskrivning av panna 5, Mälarenergi AB

Kraftvärmeverket i Västerås och Mälarenergi AB beskrivs kortfattat, mer ingående beskrivs panna 5. Där särskilt utformningen av rökgasstråk, värmeöverförande ytor och sotningssystem beskrivs.

1.3.1.3 Kapitel 4 Resultat

Statistik för sotningssystemet som tagits fram presenteras här tillsammans med beräkningar av förbrukningar, kostnader för sotningen samt analyser av sotningens påverkan på värmeöverföringen.

1.3.1.4 Kapitel 5 Avslutande diskussion

De resultat och analyser som visats innan diskuteras och möjliga felkällor och osäkerheter tas upp.

1.3.1.5 Kapitel 6 Slutsatser

Slutligen presenteras de slutsatser och förslag till fortsatt arbete.

1.3.1.6 Bilagor

I bilagorna finns samband för värmeöverföring, bränslestatistik för panna 5, sotningsstatistik samt olika diagram och driftdata.

2 Teori

2.1 Biobränslen

Biobränsleanvändningen för energiproduktion uppgick år 2005 till 100 TWh, potential finns för att på sikt nå 220 TWh från biobränslen⁷. Biobränslen används dels för energiproduktion genom förbränning i kondenskraft-, värme- och kraftvärmeverk men även som drivmedel och el-produktion från förgasad biomassa. Biobränslen omfattar alla bränslen från biologiskt-material. Enligt SIS⁸ 2000 gäller följande definition för biobränsle respektive biomassa: (Swebio, 2007)

”Bränsle där biomassa är utgångsmaterial. Bränslet kan ha genomgått kemisk eller biologisk process eller omvandling och ha passerat annan användning”

”Material med biologiskt ursprung som inte eller endast i ringa grad omvandlats kemiskt eller biologiskt”

Definitionen för biobränslen och biomassa medför att mängden bränslen som omfattas är stor, vilket medför en stor variation mellan biobränslens olika egenskaper och sammansättningar.

2.1.1 Indelning av biobränslen

Som kan visas av beskrivningen nedan är variationen av biobränslen stor och bränslena skiljer sig åt i energi- innehåll, fuktighet, kemisk sammansättning mm. Beroende på bränslets egenskaper är det mer eller mindre användbart vid förbränning, vissa bränslen kan behöva förbehandling av olika slag innan förbränningen. För de flesta bränslen krävs finfördelning av bränslet innan det kan tillföras eldstaden. Den stora variationen av bränslen medför att de föreningar som bildas och partiklar som frigörs vid förbränning av biobränslen varierar beroende på det bränsle som används. De beläggningar som bildas inne i pannan blir därmed varierande, mer om beläggningars tillväxt i kapitel 2.3.

Biobränslen in i av SIS i följande fem bränslegrupper:

2.1.1.1 Trädbränslen

Trädbränslen är bränslen som kommer direkt från skogen. Följande bränslen har inte heller genomgått någon kemisk process. Trädbränslen omfattar följande bränslen: rent trä (spån, flis och pulver), skogsavfall(GROT⁹), klenvirke, bark, samt trädbränsle som har förädlats (pellets, briketter)

2.1.1.2 Agrara bränslen

Jordbruksbränslen eller agrara bränslen är biobränslen som kommer från jordbruket. Jordbruksbränslen omfattar många biobränslen, här nämns några: halm, spannmål, olivavfall, spannmålsavrens, energiskog, energigräs, kakaoböror, citrusavfall och sheanötter m fl.

⁷ Enligt Swebio, Svenska Bioenergiföreningen, 2003

⁸ SIS, standardiseringen i Sverige

⁹ GROT, är en förkortning som används för avverkningsrester som grenar och toppar.

2.1.1.3 Biobränslen från sorterat avfall

Avfallsbränslen är samtliga bränslen som förbränns i avfallspannor. Omfattningen av bränslen är mycket stor. Till denna bränslegrupp hör även rötgas från reningsverk och deponigas.

2.1.1.4 Returlutar

I massaindustrin bildas returlutar som biprodukt när träflis kokas till pappersmassa. Returlutar används som bränsle vid förbränning.

2.1.1.5 Torvbränsle

Torv tillväxer mycket långsamt och består av ofullständigt nedbruten biomassa. Utav torv bildas briketter eller pellets. Torv är idag omdiskuterat huruvida det ska klassas som biobränsle eller fossilt bränsle.

2.1.2 Biobränslens beläggningbildandeegenskaper

Karakteristiken och sammansättningen av de beläggningar som bildas beror i hög grad på vilka bränslen som eldas i pannan. Beroende på bränslets sammansättning och förbrännings-egenskaper frigörs olika ämnen från förbränningen som följer med rökgaserna och kan fastna vid ytorna och bilda olika typer av beläggningar.

Bränsleegenskaper som är av betydelse vid beläggningstillväxt är svavel-, klor-, ask-, och fukthalt samt partikelstorlek. Biobränslen påverkas av sitt ursprung, fuktigheten, vilka ämnen som frigörs, askhalter, förbränningsegenskaper mm varierar mellan olika biobränslen men även inom samma typ av bränsle. Beroende på platsen bränslet vuxit på kan innehålla olika ämnen och kemikalier. Bränslenas kemiska sammansättning påverkar hur bränslen blandas vid förbränning. Ett exempel är att svavelrika bränslen som torv och rötslam kan medföra positiva effekter hos trädbränslen som har höga alkalihalter. Bränslen med låga asksmältpunkter kan blandas med bränslen med höga asksmältpunkter för att egenskaperna ska bli bättre. Bränslen som anses vara besvärliga kan vanligen blandas in i små mängder i bränslen som fungerar bra utan att problem uppstår (Strömberg B., 2005).

Det är skillnad mellan hur ämnen binds och förekommer i fossila bränslen jämfört med biobränslen. I fossila bränslen är ämnena vanligen bundna i olika mineraler, medan i biobränslen är ämnena vanligen organiskt bundna eller jonbundna. Detta medför att de frigörs lättare i biobränslen och kan reagera och bilda nya föreningar. Skillnaden mellan fossila bränslen och biobränslen är även stor vad gäller den kemiska sammansättningen och halter av olika ämnen i bränslena. Biobränslen innehåller högre halter av kalium, fosfor, kalcium och ibland klor än fossila bränslen. Förekomsten av kalium är relativt låg i torv, men hög för övriga biobränslen. Generellt innehåller snabbväxande biobränslen höga halter av alkali. Alkaliföreningar förekommer i både fossila bränslen och i biobränslen, men vanligen är föreningarna mer lösliga i biobränslen och har lägre smältpunkter. Detta medför att de erfarenheter vad gäller beläggningar mm som finns från koleldning inte helt kan användas då biobränslen förbränns (Nordin m.fl., 1997).

Då nya bränslen introduceras i en panna kan nya typer av beläggningar uppstå, därmed kan det vara klokt att se över hur sotningen sker beroende på vilka egenskaper det nya bränslet har. Vet man att det nya bränslet har tendens att bilda mycket beläggningar kan det vara klokt att förkorta sotningsintervallerna då detta bränsle tillförs. Eller tvärt om, då bränslen som bidrar i liten utsträckning till att beläggningar byggs upp kan sotningsintervallen ökas.

2.1.2.1 Trädbränslen

I rena trädbränslen är främst kalcium och kalium askbildande ämnen. De bränslen som varit i kontakt med mark, som GROT och bark har ofta fått med grus och jord bland bränslet. GROT innehåller även höga halter av kalium, kalcium och fosfor. Vid förbränning av bark förekommer höga halter av kalium och aska, vissa barker kan även innehålla höga halter av korrosiva föreningar som NaCl och KCl. Returträflis innehåller metallskrot vilket leder till metallsmältor vid förbränning. Även tungmetaller som zink, bly m.fl. och kemikalier som alkali och klor mm. förekommer i returträ. Problem med avlagringar, sintring och korrosion kan förekomma vid förbränning (Nordin A. & Levén P.) (Henderson P. m.fl.).

2.1.2.2 Agrara bränslen

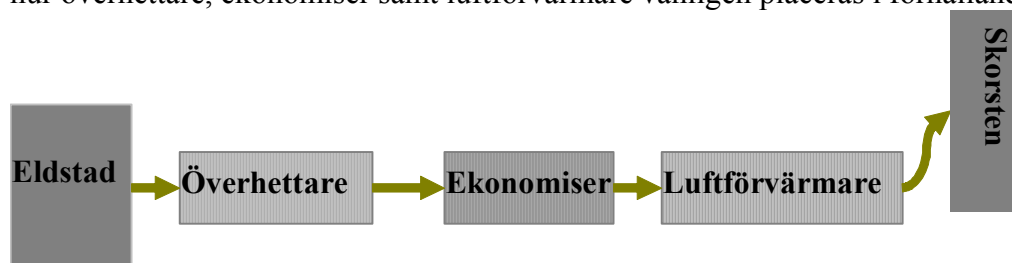
I jordbruksbränslen är vanligen halter av kalium, kisel, klor och svavel höga. Även höga halter av alkali förekommer i de biobränslen med hög tillväxt, som snabbväxande träd och halm. Halterna av dessa ämnen varierar beroende på bränsle samt när det skördas, vart det odlas samt gödsling. Vid förbränningen kan dessa föreningar innebära problem i form av beläggningar mm. Egenskaperna i salix varierar kraftigt beroende på odlingsplats samt förekomst av GROT. Salix innehåller vanligen relativt mycket kalium och fosfor.

2.1.2.3 Biobränslen från sorterat avfall

Avfallsbränslen innehåller vanligen högre halter av ämnen som klor, alkali och tungmetaller än trädbränslen. I hushållsavfall kan smältor bildas av glas och aluminium som följer med soporna. Slam medför att natrium, kalium och fällningskemikalier kan bilda föreningar med låg smältpunkt. Oorganiska alkaliklorider förekommer i bränslet. Däck medför ackumulering av metalltråd samt förekomst av zink. Papper medför att föreningar med låg smältpunkt kan bildas av natrium och kalium även oorganiska alkaliklorider förekommer. Problem med avlagringar, sintring, korrosion kan förekomma. Plast innehåller klor vilket medför problem med korrosion och avlagringar.

2.2 Värmeöverföring

Värmeöverföring sker i pannans värmeöverförande ytor. De värmeöverförande ytorna består vanligen av rör. Genom rörens ytor sker värmeöverföring från det varmare till det kallare mediet genom värmeledning, värmekonvektion samt genom värmestrålning. Samband för värmeöverföring beskrivs närmare i Bilaga A. Ytornas utformning och placering varierar beroende på dess funktion. I Figur 2-1 visas rökgasernas väg från eldstaden till skorstenen och hur överhettare, ekonomiser samt luftförvärmare vanligen placeras i förhållande till varandra.

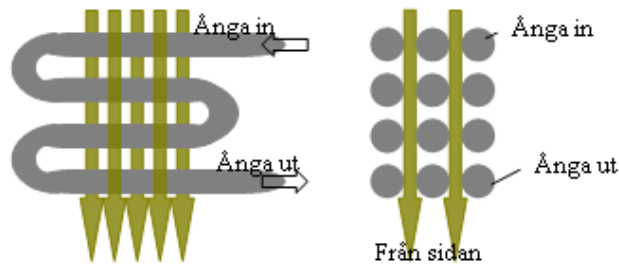


Figur 2-1: Rökgasernas väg genom pannan

Inne i eldstaden är så kallade "kokarytor" placerade längs med väggarna, kokarytor används för att koka vattnet till ånga. Från kokarytorna leds det förångade vattnet vidare till konvektions ytor. Konvektions ytor placeras längs med väggarna i rökgasstråket efter eldstaden. I rökgasstråkets övre del är överhettarna placerade, här är temperaturerna mycket

höga. Överhettare används för att öka ångans energiinnehåll, entalpi. Ångan används till att producera el genom att driva en turbin kopplad till generator och eller till att värma hetvatten till fjärrvärmenät. I rökgasstråkets svalare delar kan ekonomiser användas för att förvärma vattnet innan eldstaden och luftförvärmare användas för att värma förbränningsluften.

Vanligen är överhettare, ekonomiser och luftförvärmare uppbyggda av parallellkopplade tubrör som bockats fram och tillbaka, så att varje tubrör bildar flera rader. I Figur 2-2 visas hur bockningen kan se ut.



Figur 2-2: Skiss över tubrörens bockning sett framifrån och från sidan.

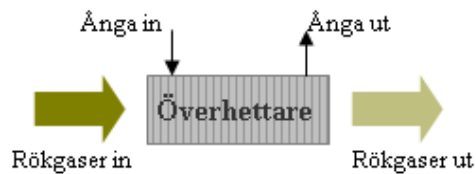
I vyn från sidan ses hur tubrören är placerade bredvid varandra i kolumner. Den översta raden i kolumnen möter rökgaserna. Varje tubrör bockas (skissen till vänster) i flera rader, på så sätt kan ångan värmas flera gånger av rökgaserna. En sekvens av parallellkopplade tubrör som bockats i flera rader kallas för tubpaket. Vanligen delas en överhettare eller ekonomiser upp i flera paket. Raderna kan placeras rakt under varandra eller i sickasack. Vid sickasackplacering blir ytan mot rökgaserna större och värmeöverföringen per volymenhet bättre. I Figur 2-2 är tubrören placerade rakt under varandra.

2.2.1 Överhettare

Överhettare placeras i rökgasstråkets varmaste delar direkt efter eller ovanför eldstaden. Temperaturerna på rökgaserna är mycket höga i detta område. Vilket leder till stor temperaturskillnad mellan tubernas ytor och rökgaserna. I överhettaren värms ångan till temperaturer över kokpunkten på ångan (ångan överhettas). Entalpiökningen höjer pannans verkningsgrad genom att mer energi kan utvinnas ur ångan i turbinen. Överhettning av ångan medför att ångan torkar, detta minimerar risken för att kondensat ska fällas ut i turbin och ledningar. Risk för korrosionsangrepp och slitage i ledningar och turbin minskar.

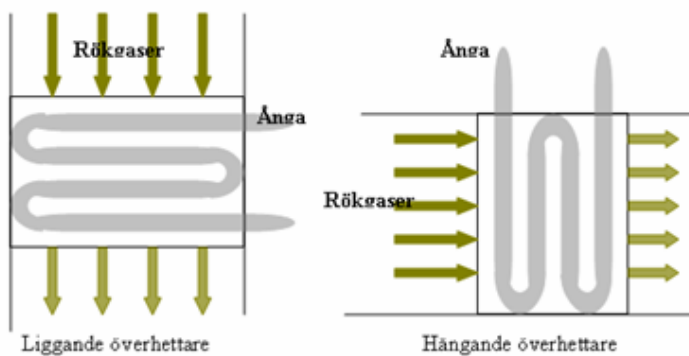
Värmeöverföringen i överhettaren sker genom konvektion eller strålning. Strålningsöverhettare placeras längs med väggarna i eller direkt ovanför eldstaden. Konvektionsöverhettare är placerade efter eldstaden. Konvektionsöverhettarna nås inte av flamstrålningen, utan värmeöverföringen sker från de heta rökgaserna. En kombination av olika typer av överhettare ger en mer stabil och jämn uppvärmning av ångan även då pannans last förändras.

Ånga leds från konvektionsytorna via en fördelningslåda in i överhettarnas tubrör, diametern på tubrören är vanligen mellan 20 och 50 mm. När ångan passerat genom tubröret leds ångan till en samlingslåda, från vilken ångan leds vidare till nästa överhettare eller turbinen. Ångans flöde genom tubrören kan riktas med- eller motströms rökgasflödet, en skiss visas i Figur 2-3.



Figur 2-3: Skiss över medströmsångflöde i en överhettare

Påfrestningar i tubrörens material kan minskas genom medströms riktat ångflöde där temperaturerna är som högst. Materialet i tubrör väljs beroende på vilka förhållanden som råder där överhettaren placeras. Påfrestningarna för materialet är större närmare eldstaden, där har rökgaserna höga temperaturer och stort stoftinnehåll. Vanligen väljs mer påkostade material till de delar som utsätts mest för korrosionsangrepp, i övriga delar av överhettarna kan billigare material väljas. För att minska erosionsangrepp i utsatta delar kan tubskydd placeras innan tuberna. Tubpaketen placeras hängande eller liggande i rökgasstråket.



Figur 2-4: Skiss på hängande och liggande överhettare i en pannas rökgasstråk

Hängande tubpaket kan fästas i pannans balksystem och tyngdkraften håller sedan tuberna på plats i sidled. Liggande tubpaket kräver bäranordning för att tubpaketen ska hållas på plats. Vanligen används bärtuber för att bära upp de liggande tuberna. På grund av de höga temperaturerna i överhettardelen kyls bärtuberna med vatten eller ånga. Hur upphängningen sker påverkar delningen mellan tuberna (Eklund m.fl., 2004).

Avstånden mellan tubrören och raderna beror på vilken beläggningstillväxt som förekommer, då risken för beläggningar är stor används vanligen stor delning mellan tubrören. Ett glest tubpaket underlättar rengöring och för rökgaserna att passera. Delningen av tubrören påverkar valet av sotningsmetod, rengöringen av ytorna måste vara effektiv. Är delningen för tät kan rengöring av tuberna vara svårt och igensättning kan uppstå. Är tubrören placerade glest blir värmeöverföringen sämre än om tubrören placerats nära varandra. Detta kan kompenseras med mindre delningen mellan tubrörens rader. Ett exempel på detta är skärmöverhettare, de har stora mellanrum mellan tubrören men delningen mellan raderna kan vara så liten som någon millimeter. (En skärm bildas) Värmeöverföringen i en skärmöverhettare tas främst upp genom strålning. Vanligen placeras denna typ av överhettare där temperaturerna är som högst, i toppen på eldstaden.

Överhettarpaketet utformas så att temperaturen på ångan blir tillräckligt hög då tubernas ytor har fått beläggningar, utan att det uppstår för höga temperaturer då tubrörens ytor är rena.

Uppdelningen i flera paket väljs beroende på rökgasens temperatur, ångans temperatur samt möjlighet till reglering mellan paketen. Vanligen dimensioneras nya pannor för att ångans utgående temperatur ska vara stabil för en lägsta last. Vid högre last regleras temperaturen på ångan med hjälp av insprutning eller kylning av ångan. I äldre pannor är ångans temperatur vanligen dimensionerad mot en högsta last vilket medför att vid driftfall på lägre last blir ångtemperaturen svajig.

Då överhettaren är uppdelad i flera paket är det första överhettarpaketet som ångan tillförs placerat längre bak i rökgasstråket än det sista. Det sista överhettarpaketet placeras där temperaturerna är så höga som möjligt för att få hög temperatur på den utgående ångan. När fler än en överhettare används finns möjlighet att reglera ångan mellan överhettarna. Den utgående ångans temperatur blir mer stabil över ett större lastintervall. Reglering av ångans temperatur sker genom kylning med kallare ånga eller med insprutning av matarvatten¹⁰. För att begränsa materialets temperatur används reglering på ångan så att temperaturen in i överhettaren är tillräckligt låg för att kyla materialet i tuberna.

Genom att använda två överhettningsssteg vid olika tryck, hög- och mellantrycksöverhettning, kan verkningsgraden på pannan höjas. Efter första överhettningen tas energi ur ångan i högtrycksturbinen. Ångan leds in i pannan för att överhettas på nytt men nu med ett lägre tryck. Mellantrycksöverhettaren placeras längre bak i rökgasstråket, temperaturerna på ångan blir lägre än i högtrycksöverhettaren. Trycket på ångan är lägre i mellantrycksöverhettaren, materialet tål högre temperaturer. Ångflödet riktas vanligen motströms rökgaserna. Detta beskrivs mer i Bilaga A (Eklund m.fl., 2004).

2.2.2 Ekonomiser

Ekonomiser används för att värma matarvattnet innan pannans kokarytor. Värme ur rökgaserna används för att värma vattnet, det värme som ekonomisern upptar tillgodogörs direkt i ångbildningen, mindre energi krävs för förångning av vattnet. Pannans verkningsgrad höjs. Ekonomisern delas likt överhettaren ofta upp i flera paket. Storleken på ekonomisern beror dels på den effekt som behövs för att värma matarvattnet till önskad temperatur och i önskad mängd och dels önskad rökgastemperatur efter ekonomisern.

Eftersom ekonomiserns paket placeras efter överhettarpaketen är rökgastemperaturen lägre än i överhettardelen. Lägre rökgastemperaturer ger bättre förhållanden för materialet i tuberna samt sämre förhållanden för värmeöverföring.

Vanligen är tubrören i ekonomisern försedda med flänsar eller fenor för att öka värmeöverföringen. Tubrören förses med en utbyggnad (kam) för att öka ytan mot rökgaserna så att mer värme kan överföras. Utseendet på kamflänsarna varierar, beroende på vilka egenskaper som är viktiga för varje ekonomiser. För att få stor värmeöverförande yta är en åttakantig form lämplig. Ju mindre avstånd mellan flänsar desto högre risk för beläggningssbildande och att beläggningarna blir sammanhängande. Fyrkantiga kamflänsar är vanligast. Är risken för igensättning stor är tubrader med stor delning och rombformade kamflänsar att föredra. Vid högre tryck än 50 bar inne i ekonomisern väljs vanligen stålrör med flänsar som

¹⁰ Matarvatten är råvatten som behandlats för att salterna i vattnet inte ska medföra slitage inne i pannan.

svetsats dit, vid tryck under 50 bar används kamflänsar. Kamflänsarna kan även vara förskjutna i förhållande till varandra eller placerade mitt för, även detta påverkar värmeöverföringen. I Figur: 2-5 visas ett foto taget på kamflänsar i ECO2 i panna 5, kraftvärmeverket i Västerås.



Figur: 2-5: Kamflänsar i Ekonomiser i panna 5, kraftvärmeverket i Västerås (Foto: A. Pettersson, Mälarenergi AB, 2007)

Kamflänsade tubrör används vanligen där beläggningstillväxten är låg, vid stor beläggningsrisk i ekonomisern används släta tubrör som är lättare att rengöra. Är beläggningstillväxten mycket stor används hängande tuber i ekonomisern. I biobränslepannor är kamflänsadetubrör vanliga. Avfallseldade pannor har vanligen hög beläggningstillväxt, där är det vanligt att samtliga paket har släta tuber (Eklund m.fl., 2004) (Kjörk A., 2003).

2.2.3 Luftförvärmare

Luftförvärmarens paket är placerade efter ekonomisern och är den värmeöverförande yta som rökgaserna når sist. Luftförvärmare används för att öka temperaturen på förbränningsluften innan den tillförs eldstaden samtidigt som rökgaserna kan kylas ned ytterligare innan skorsten. Hög temperatur på tillförd förbränningsluft medför att mindre energi vid förbränningen åtgår till att värma luften. Genom att mindre energi från förbränningen används för att värma upp luften kan mer energi utnyttjas för att värma ångan. Tändnings och förbränningsförloppet påverkas positivt av förbränningsluftens ökade temperatur. Rökgasförlusterna minskar, förbränningen blir mer fullständig, pannans temperatur höjs och verkningsgraden blir bättre.

Regenerativa luftförvärmare används i större anläggningar och fungerar så att rökgasen avger värme till en massa som i sin tur avger värme till luften. Både luftförvärmare och ekonomiser kyller rökgaserna och minskar därmed avgasförlusterna och höjer pannans verkningsgrad (Eklund m.fl., 2004)

2.3 Beläggningar

Vid förbränningen frigörs partiklar som följer med rökgaserna ut ur eldstaden. Dessa partiklar kan reagera med de ytor som de möter och bilda beläggningar antingen genom att reagera med materialet eller bilda ett nytt yttre lager. Beläggningar som bildas på ytor inne i pannan försämrar verkningsgraden på pannan genom att värmeöverföringen minskas genom ytorna. I detta kapitel beskrivs bildningen av beläggningar och dess följder närmare.

2.3.1 Bildning av beläggningar

Beläggningsbildningen kan beskrivas i 6 steg:

- 1) Ämnen frigörs ur bränslet vid förbränningen och transporteras med rökgaserna ut ur eldstaden.
- 2) Kemisk omvandling av ämnena sker genom att de reagerar med varandra och bildar nya föreningar eller träffar ytor och bildar beläggningar. Föreningar övergår från gas fas till fast fas.
- 3) Föreningarna som bildats transporteras med rökgaserna. På de ytor som rökgaserna möter bildas beläggningar genom att partiklar fastnar eller kondenserar ut på ytorna. Hur och var kondensering inträffar beror på föreningarnas kondensationstemperatur.
- 4) Ett första lager bildas på ytorna.
- 5) Beläggningarna tillväxer av nya partiklar som träffar ytorna.
- 6) Ett jämviktstillstånd inträffar efter en tid och beläggningstillväxten avtar.

Vid förbränningen frigörs partiklar som är förbrända eller oförbrända rester från bränslet. De partiklar som frigörs ur bränslet förs med rökgaserna ut ur eldstaden och kan fastna på de ytor som rökgasen passerar. Hastighet på rökgaser och partikeltäthet i rökgaserna påverkar antalet partiklar som passerar ytorna och har möjlighet att fastna. Då partiklarna möter ytor eller beläggningar inne i rökgasstråket kan de reagera med materialet i tuberna eller tidigare beläggning. Sker ingen reaktion med ytan kan partiklarna bilda ett nytt yttre lager.

Faktorer som påverkar beläggningstillväxten är

- Bränslets egenskaper, vilka ämnen som frigörs vid förbränningen samt bränslets svavel-, klor-, ask-, och fukthalt samt partikelstorlek.
- Hur pannans konvektionsdel är uppbyggd, om avståndet mellan tubraderna är glest träffar färre partiklar ytorna än då tuberna är tätt placerade.
- Sotningsmetod, sotningens effektivitet och sotningsintervall
- Pannans last
- Rökgasernas hastighet, temperaturfördelning och partikeltäthet
- Partiklarnas storlek och hastighet

Beläggningen som först uppstår är vanligen ett lager av alkalimetaller som bildar ett jämnt skikt över tubens yta. Små partiklar har stor reaktionsyta i förhållande volymen och kan lätt reagera. Då stora partiklar (5-10 mikrometer) träffar tubytan bildas omfattande beläggningar. Bränslen som är lätta eller finfördelade kan lämna eldstaden mer eller mindre oförbrända genom att de snabbare följer med rökgaserna upp ur eldstaden. Uppehållstiden i eldstaden kan därmed bli för kort för att fullständigförbränning ska ske. Beroende på vilka bränslen som förbränns så bildas olika typer av partiklar och föreningar. Detta påverkar i sin tur behovet av rengöring, vid förbränning av bränslen som ger upphov till omfattande beläggningar är reningsbehovet större än vid andra bränslen. Vid beläggningsbildning i värmeöverförande ytor är vanligen ämnen som flyktiga metaller och klor i föreningarna (Henderson P. m.fl.).

Beläggningar i överhettaren är ungefär hundra gånger mer hållfasta än de beläggningar som bildas i ekonomisern, detta beror att temperaturerna är högre i överhettaren. Är temperaturerna höga smälter partiklarna lättare och bildar en hård beläggning på ytorna. Vid lägre temperaturer är risken mindre för att hårda lager bildas men lösa partiklar kan ansamlas och bilda tjocka lager som minskar värmeöverföringen. Stora temperaturskillnader mellan ångan i överhettartuberna och rökgaserna utanför, medför att de gasformiga föreningar som finns i rökgaserna lättare kan kondensera ut på tubrörens ytor. Föreningarna kan även kondensera i rökgaserna genom att temperaturen minskar, då bildas nya partiklar som kan reagera med ytorna (Sandberg J., 2007).

Beläggningen förändras under tiden den finns i pannan. Då beläggningen bildas och tillväxer är den först porös. Vid termisk- och kemisk sintring fäster beläggningen starkare till tubytorna och sammanhållningen i beläggningen ökar. När beläggningarna är porösa har de vanligen låg fastbundenhet till tubytan. Desto längre tid beläggningarna finns inne i pannan desto hårdare blir de och ju svårare blir de att avlägsna. Detta kallas för slaggnings då det sker på ytorna i eldstaden, och de beläggningar som bildas på konvektionsytorna benämns som fouling (Nordin m.fl., 1997).

2.3.1.1 Slaggnings

Beläggningar som bildas på ytor inne i eldstaden kallas för slaggnings. Smälta eller kladdiga partiklar fastnar på ytorna och bildar hårda lager. I fluidbäddar kan slaggnings medföra problem för bäddens fluidisering. Slaggnings på rosten i rosterpannor påverkar hur flödet av bränsle och primärluft kan tillföras eldstaden. Beläggningar som fastnat längs med väggarna i eldstaden kan efter en tids tillväxt då beläggningen blir för tung lossna och orsaka skador inne i eldstaden. Faktorer som påverkar uppbyggnaden är bland annat, hastigheter i pannan, förbrännings och beläggningstemperaturer samt egenskaper i bränslet. Egenskaper som svavel- och klorhalter, fukthalt, partikelstorlek samt askhalt påverkar beläggningarna.

2.3.1.2 Fouling

Beläggningar i de delar av pannan där konvektion sker kallas för "fouling". Fouling bildas av partiklar och kondenserade gaser som förs med rökgaserna ut ur pannan. Fouling uppstår vanligen genom att partiklar innehållande alkali kondenseras på ytorna och bildar ett första lager på ytorna. På detta lager kan sedan andra partiklar fastna, smälta partiklar bygger på beläggningarna. Egenskaper som svavel- och klorhalter, partikelstorlek samt askhalt påverkar beläggningarna. Sotningsmetod, sotningens effekt samt sotningsintervallen påverkar uppbyggnaden av beläggningar.

2.3.1.3 Följder av beläggningar

Beläggningarna minskar värmeöverföringen vilket medför högre rökgastemperaturer längre ned i rökgasstråket. Minskad värmeöverföring medför även försämrade pannverkningsgrad.

Vid omfattande beläggning i rökgasstråket kan tryckfall uppstå, detta medför att fläktarna kan behöva arbeta hårdare. Vid riktigt omfattande tillväxt kan mellanrummen mellan tubrören sättas igen. Beläggningar medför ökad risk för korrosionsskador.

2.4 Sotning

Sotningssystemets uppgift är att avlägsna de partiklar och beläggningar som bildats på de värmeöverförande ytorna då pannan är i drift. Det är viktigt att de värmeöverförande ytorna är tillräckligt rena för att värmeöverföringen genom dem ska vara god. Är värmeöverföringen dålig påverkas pannans verkningsgrad negativt och rökgasernas temperaturer blir höga längre bak i rökgasstråket.

För att de värmeöverförande ytorna inne i pannan ska hållas rena under drifttiden används olika sotningsmetoder. Den vanligast använda sotningsmetoden är ångsotning. I detta kapitel beskrivs olika sotningsmetoder. Tyngdpunkten läggs på ångsotning för att ångsotning är den vanligast använda sotningsmetoden men även för att denna sotningsmetod används i panna 5, beskrivs i kapitel 3.3.

Normalt rengörs de värmeöverförande ytorna grundligt när pannan står stilla under revisionen på sommaren. Men rökgasernas innehåll av partiklar och föreningar medför att det snabbt fäster nya partiklar vid ytorna och det byggs på nya lager av partiklar och beläggningar på ytorna. Genom att sotningssystemen inte klarar av att avlägsna alla beläggningar från ytorna så blir det mer beläggningar emot slutet av driftsäsongen, och man kan se att effekten sjunker (Eklund m.fl., 2004).

2.4.1 Rengörningseffektivitet

Sotningsmetodens effektivitet är beroende av beläggningstillväxt, placering, temperatur-tålighet mm. Val av bränslemix och sotningsintervall är faktorer som kan ändras under drift-tiden och därmed kan påverkas ganska enkelt. Placeringen på sotblåsar, dess avstånd till ytan som ska rengöras är viktigt för att få tillräckligt tryck för att bryta upp beläggningarna. Hur sotblåsarna är konstruerade och rörelsemönster påverkar ytan för rengöring och mängden av beläggningar som kan avlägsnas. Sotningsmetodens effektivitet beror på hur väl sotningsutrustningen är anpassad till de beläggningar som bildas i den aktuella pannan.

För att bestämma hur effektiv sotningen är, är rökgasens temperatur vid olika positioner i bakre draget den mest användbara parametern. Denna kan sedan kombinerat med andra parametrar användas för att beräkna den överförda effekten. Genom att optimera sotningens effektivitet kan man även minska de problem som sotningen kan ge upphov till. Optimering av sotningens intervall är viktigt så att de inte är för täta eller för långsamma. Avvägning mellan rena ytor och risk för skador samt förbrukning av ånga måste göras (Kjörk A., 2003).

2.4.2 Sotningsintervall

Då intervallen mellan sotningarna är täta hinner beläggningstillväxten inte bli lika stor som om längre intervall används. Detta innebär att minskningen i värmeöverföring och effekt mellan sotningarna inte blir lika stor. Ångsotning kan vara påfrestande för materialet i tub-rören och orsaka både erosiva och korrosiva skador. Därför är det viktigt att sotningsinter-vallen inte blir för täta så att sotningen orsakar skador på tubrören. Ångsotning medför även en kostnadsfråga, i och med att täta sotningsintervall medför ökad förbrukning av sot-ningsånga.

Vid sotning med akustisksotning används vanligen riktigt täta intervall för att hålla undan partiklar som kan fästa på ytorna och börja bilda beläggningar. Denna sotningsmetod fungerar främst som preventivmetod mot beläggningar, den är inte tillräckligt kraftfull för att avlägsna redan bildade beläggningar på samma sätt som ångsotning.

2.4.3 Styrning av sotning

2.4.3.1 Sekvensstyrd sotning

Den vanligaste styrningen av sotningen är att starta ett sotningsprogram i ett förutbestämt mönster. Sotningen sker genom att tidigare vald sekvens aktiveras och sotningen påbörjas. En vertikal sekvens innebär att sotningen startar högst upp i rökgasstråket med den första överhettaren efter eldstaden och avslutas med den sista delen, vanligen luftförvärmaren. En vertikal sekvens innebär att risken för att beläggningar som lossnat från paketen ovanför ska träffa sotningsutrustningen vid paketen nedan är mindre än vid horisontell sotning. Horisontell sekvens innebär att den översta raden sotas först följt av nästa rad och så vidare.

2.4.3.2 Behovsstyrd sotning

Behovsstyrd sotning är ett sätt att optimera sotningen till att ske endast då behovet av sotning finns. På detta sätt styrs sotningsintervallerna av behovet av rengöring av ytorna. Olika metoder för behovsstyrd sotning finns. I värmeforskrapport nummer 841¹¹ nämner A. Kjörk två olika sätt för att styra sotningen. Det ena sättet är att använda värmeflödesmätare för att mäta hur beläggningstillväxten sker lokalt. Denna metod har främst använts inne i eldstaden. Det andra sättet är att använda mätsignaler på tryck och temperaturer för att indikera beläggningens tillväxt, och behovet av rengöring. Denna metod har främst använts för värmeöverförande ytor utanför eldstaden. Fördelen med det senare systemet är att befintlig mätutrustning kan användas och investering i nya mätredskap är liten. Styrsystemet till sotblåsarna behöver kunna regleras så att sotblåsarna kan startas och användas enskilt (Kjörk A., 2003).

2.4.4 Ångsotning

Vid ångsotning används en sotblåsare för att under högt tryck spruta (blåsa) in ånga i pannan. Sotblåsaren består av ett ångrör (lans) försedd med munstycken (dysor), i Figur 2-6 visas bild på en sotblåsarlans tagen mellan två av överhettarpaketen i panna 5, ytterst på lansen kan en av dysorna ses. Under sotningen leds ånga in i ångröret för att under högt tryck blåsas ut genom dysor mot beläggningen. Ångan träffar beläggningen med ett högt tryck så att beläggningen bryts upp mekaniskt och avlägsnas från tubens yta. Sotningssystem med ånga är en vanligt använd sotningsmetod metoden har hög rengörande effekt och kan anpassas till olika delar av pannan. Ångsotning används både i överhettaren där beläggningarna är hårda och temperaturerna höga och i ekonomisern där temperaturerna är lägre och beläggningarna lösare (Eklund m.fl., 2004).

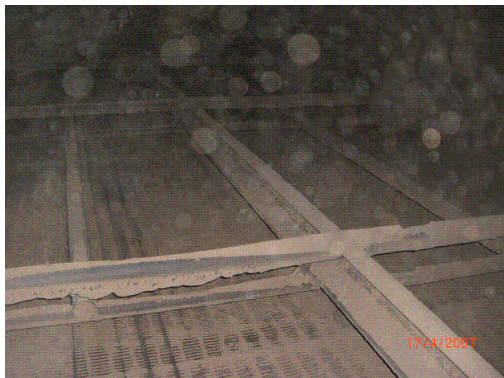


Figur 2-6: Bild på roterande sotblåsarlans i panna 5(Foto: Mälarenergi AB, 2001)

Det finns olika modeller av sotblåsare och lansens och dysornas utformning varierar och anpassas till rådande förhållanden där sotblåsaren ska användas. Dysans utformning och antal påverkar det tryck som träffar beläggningen. Ångans flöde och tryck kan anpassas genom att olika diametrar på dysan kan väljas. En dysa med stor diameter medför ett stort ångflöde ur dysan vid lägre tryck. Ökat ångflöde kan tillåta minskat tryck utan att rengöringseffekten blir mycket lägre. Ett bra strömningsflöde ur dysan minskar förluster och ångstrålen kan få högt tryck. Lansarna kan vara fastsittande eller utdragbara, de kan rotera, vara raka eller formade som krattor. Krattor är ”T” formade lansar som kan sprida ut dysorna ytterligare och fördela

¹¹ Kjörk A., *Behovsstyrd sotblåsning för bio- och avfallseldade pannor – inventering och teknikval*, 2003, Värmeforskrapport nr 841

ången över ytan. En bild tagen på en krattsotblåslans i ekonomiserns översta paket i panna 5 visas i Figur 2-7.



Figur 2-7: Bild på krattsotblåslans i ekonomiser2s översta paket i panna 5 (Foto: A. Pettersson, Mälarenergi AB, 2007)

Där temperaturerna på rökgaserna är höga används utdragbara lansar. Eftersom Rökgasernas höga temperaturer medför stora påfrestningar för materialet i sotblåsaren, som behöver kylas av den kallare sotningsången för att inte skadas. Sotblåslansen kan inte vara inne i pannan under drift utan lansen behöver kunna dras ut när sotningen avslutats. Lansen förs in i pannan och tillbaka ut igen av en motor placerad utanför pannan. Vid överhettarna är temperaturerna höga och beläggningarna ofta hårda. Roterande utdragbara lansar med ett fåtal dysor används vanligen i överhettarna. Få dysor används för att få högt tryck på ången, rotering av lansen sprider ången över ytan. Sotblåsarna rengör mer effektivt då de går in i pannan och ytorna på beläggningarna träffas första gången än då sotblåsaren är på väg tillbaka. Detta har medfört att en del sotblåsare försetts med varvtalsstyrda motorer för att hastigheterna in i och ut ur pannan ska kunna justeras. Vid roterande lansar finns en förprogrammering så att rengöringen blir så stor som möjligt (Eklund m.fl., 2004).

I ekonomisern är rök Gastemperaturerna lägre och beläggningarna lösare. Lägre temperaturer medför mindre påfrestningarna på materialet och sotblåsarna kan vara inne i pannan under driften, fastsittande sotblåsare är vanligt använda. Lösare beläggningar medför att trycket genom varje dysa kan vara lägre. Varje lans kan förses med fler dysor för att få god spridning på ången. Det är vanligt att använda krattor för att få bra spridning på ången.

Hur effektiv ångsotningen är beror på faktorer som ångtryck, ångflöde, avstånd och vinkel mellan beläggning och dysa, temperatur på sotningsången, beläggningens egenskaper och sotblåsarnas rörelsemönster. Ångstrålens anslagsvinkel mot beläggningen har betydelse då beläggningarna är hårda och stor kraft krävs för att rengöra ytan. Vid lösare beläggningar är anslagsvinkeln av mindre betydelse. Kraften blir större då ångstrålen är riktad rakt mot beläggningen, effekten minskar ju snedare anslagsträffen blir. Avstånd mellan sotblåsare och beläggning påverkar kraften mot beläggningen. Genom att ångstrålen blir mer diffus då avståndet ökar blir även anslagskraften lägre. Anslagskraften avtar kvadratisk med avståndet i och med att ångstrålens yta växer kvadratisk med diametern, kraften blir utspridd över en större yta (Eklund m.fl., 2004).

Sotningsången tas vanligen efter överhettarna och har då en temperatur på ungefär 330°C. För ej få för högt tryck vid sotningen används tryckreglering. För att anpassa ångans tryck vid sotning av olika delar kan trycket på ången regleras beroende på vilken sotblåsare som används, i avancerade system kan temperaturen regleras.

Vid ångsotning blir tubernas ytor utsatta både för erosions- och korrosionsangrepp. Det finns risk för att sotningsånga kondenserar i ledningar och för med sig utkondenserade vattendroppar in i pannan. Vattendropparna har högre rörelseenergi än ångan och det medför att krafterna som träffar beläggningarna blir större än om enbart ånga träffar ytan. Det finns ångsotblåsare som är designade för att utnyttja kondensatets ökade rengöringseffekt¹². I dessa kan en viss mängd kondensat blandas in i sotningsångan. Ångsotningens höga krafter mot beläggningarna medför även att tubmaterialet utsätts för höga krafter. Erosiva skador kan uppstå i tuberna och leda till att tubrören spricker. Hög anslagskraft för ångan mot en beläggning längre in i tubpaketen medför skadligt höga anslagskrafter mot de närmaste tuberna (Kjörk A., 2003).

För att minska risken för att skador från kondensat i sotningsångan kan olika åtgärder vidtas: Innan sotningen påbörjas värms ledningarna upp så att ångan inte ska kondensera, detta minskar risken för att kondensat ska kunna blåsa in i pannan.

Använda lägre tryck och flöde på sotningsångan precis i början, då medför eventuellt kondensat lägre risk för tubskador inne i pannan. Normalt flöde återtas snabbt så att sotningen blir effektiv. En sänkning från 25 till 20 bar ger en liten minskning av ångans utgångshastighet, men kan ge mindre materialförlust.

Tubskydd kan sättas på de tuber som sotas allra först där risken för kondensat träffar är som störst.

För att minska risken för erosionsskador är avståndet mellan tubernas ytor och sotblåsarens munstycke viktiga. Placeras sotblåsaren för nära tubernas ytor är risken för skador stor. Rengöringen i sig utsätter tubytorna för erosions- och korrosionsangrepp. Genom att beläggningar tas bort så blir den rena ytan oskyddad mot kommande angrepp (Hjörnhede A. & Henderson P., 2006).

2.4.5 Vattensotning

Vattensotning utförs likt ångsotning med en sotblåsare försedd med dysor, skillnaden är att sotningsmediet är vatten istället för ånga. Kraften som träffar ytorna är större vid vattensotning än vid ångsotning, rengöringen blir mer effektiv. Vattenstrålen träffar beläggningen med stor kraft och beläggningen bryts upp mekaniskt och genom att vattnet tränger in i porerna på beläggningarna, vattnet förångas och lossar beläggningarna. Vattensotning används vanligen mot hårda sintrade och keramikliknande beläggningar vid höga temperaturer, i närheten av eldstaden innan överhettardelen (Eklund A. & Rodin Å., 2004).

Vattensotningens effektivitet innebär även att påfrestningarna på materialet i ytorna och risken för erosionsskador är stor. Den ökade fuktigheten inne i pannan ökar även risken för korrosionsskador. Tubens ytor utsätts även för termisk utmattning genom att vattenstrålen är kallare än de ytor som den träffar. Termisk utmattning kan leda till att sprickor uppstår i avlagringen och kan på så sätt leda till att rengöringen blir bättre. Men risken är stor för att sprickor även kan uppstå i tubväggen (Hjörnhede A. & Henderson P., 2006).

2.4.6 Luftsotning

Även luftsotning utförs med en sotblåsare försedd med dysor, skillnaden är att sotningsmediet är luft istället för ånga eller vatten. Luftsotning ger en lägre rengöringseffektivitet än sotning

¹² Clyde Bergemann Smartlance har en sådan funktion, liknande modell hos Diamond är IK525-DM

med ånga eller vatten. Luftsotning påverkar inte rökgasflödet nämnvärt under rengöringen, vilket är en fördel. För att kunna ta bort beläggningar inne i pannan med luft som sotningsmedium krävs högt lufttryck och stort luftflöde. Genom att använda pulserande luftstötter kan mängden tryckluft minskas.

Korrosionsrisken är mindre än för sotning med ånga eller vatten, men luftströmmen kan föra med sig partiklar som kan orsaka erosionsskador på tubens ytor (Hjörnhede A. & Henderson P., 2006).

2.4.7 Akustisk sotning/Ljudsotning

Ljudvågor används för att skapa turbulens i rökgaserna så att beläggningar på ytorna lossnar. Vid akustisksotning används ljudvågor med olika frekvenser, hörbara (över 75Hz) och icke-hörbara (10-35 Hz). De lägre frekvenser skapar större turbulens bland rökgaserna, vilket medför att rengöringseffekten ökar. Samtidigt ökar påfrestningarna på pannan (Hjörnhede A. & Henderson P., 2006).

Akustisk rengöring är effektiv på att hålla ytor rena från beläggningar men klarar inte lika bra att rengöra ytor från beläggningar. Akustisk sotning kombineras vanligen med andra sotningsmetoder. Ofta kan det vara ett bra komplement till ångsotning. Akustisk sotning minskar uppbyggnaden av beläggningar genom att sotning utförs ofta. Vid användning av hörbara frekvenser kan bullret från anläggningen upplevas som störande, både av boende nära anläggningen och av personal. Ljudsotning används främst för rengöring av ekonomiser och luftförvärmare, i och med att temperaturerna där är lägre och beläggningarna vanligen mindre hårda och mer omfattande.

2.4.8 Fler sotningsmetoder

Följande sotningsmetoder förekommer men är ej lika vanliga som de ovan.

2.4.8.1 Shower Cleaning System (SCS)/ Vattendusch

SCS innebär att vatten med lågt tryck duschas över de ytor som ska rengöras. Vattnet tränger in i de porösa beläggningarna och då vattnet förångas så ökar volymen och beläggningarna trängs undan. SCS medför inte någon risk för erosionsskador, men risken för korrosionsskador är stor. Sotningsmetoden bör användas på lösa beläggningar då rengöringen av ytor med hårda beläggningar är liten. Det har även visats att om beläggningarna inte lossnar vid sotningen så kan de istället bli hårdare (Hjörnhede A. & Henderson P., 2006).

2.4.8.2 Kulsothning

Kulsothning innebär att så kallade renskulor eller clips släpps ner över de ytor som ska sotas. Kulorna träffar beläggningarna som bryts upp och ytorna rengörs. Denna sotningsmetod innebär en ökad risk för erosionsskador i och med att kulorna inte enbart sliter ner beläggningarna utan även tubernas ytor blir förtunnade. Den ökade erosionsrisken medför att tuber och väggar kan behöva skyddas för att ett alltför stort slitage inte ska uppstå. Paketen bör inte vara för täta så att kulornas framfart hindras. Kulorna eller clipsen består vanligtvis av stål eller aluminium som tål de höga temperaturer och tryck som råder inne i pannan. Aluminium används främst i delar av pannan där temperaturerna ej är höga, då det händer att aluminiumet smälter i de delar där temperaturen varit för hög (>660°C) (Eklund m.fl., 2004) (Hjörnhede A. & Henderson P., 2006).

2.4.8.3 Slagsotning

Sotningsmetoden används vanligen på hängande tubpaket i avfallseldade pannor. I avfallseldade pannor blir beläggningarna ofta torra, hårda och sintrade på denna typ av beläggningar lämpar sig slagsotning effektivt. Beläggningarna på ytorna avlägsnas när ytan deformeras mer än beläggningen och de spröda beläggningarna bryts upp. Sotningsmetoden är enkel, driftsäker och relativt billig i drift. En klar fördel är att sotningsutrustningen är placerad på utsidan av pannan vilket minskar slitage och påfrestningar på utrustningen. Sotningsmetoden används i överhettare, konvektionsytor och ekonomiser.

2.4.8.4 Sprängsotning

Denna metod används både under drift och då pannan står stilla. Metoden är effektiv mot att avlägsna löst sot samt lösa och hårda beläggningar. En nackdel med metoden är att stora mängder stoft kan frigöras och orsaka igensättningar längre bak. Sprängsotningen har främst använts i de anläggningar där permanenta beläggningar som byggts upp under eldnings-säsongen lett till att pannan måste stanna för rengöring (Hjörnhede A. & Henderson P., 2006).

En ny typ av sprängsotning som påminner om ljudsotning, kan användas som ett komplement till ångsotning. Utanför pannan monteras en utrustning i vilken kontrollerade gasexplosioner sker, tryckvågorna från dessa leds sedan in i pannan via ett horn. De kraftiga tryckvågorna rengör på detta sätt ytorna i pannans varmare delar (Eklund A. & Rodin Å, 2004).

3 Beskrivning av panna 5, Mälarenergi AB

I detta kapitel beskrivs egenskaper hos den studerade pannan. Vid beskrivningen av panna 5 läggs tyngdpunkten vid rökgasstråket, där de värmeöverförande ytorna som sotas är placerade. Vidare beskrivs den sotningsutrustning som används och sotningens ekonomi. För att få en helhetsbild beskrivs kraftvärmeverket i Västerås och Mälarenergi AB kortfattat:

*”Mälarenergi ska tillgodose kundernas efterfrågan av energi, vatten,
IT-kommunikation och där tillhörande tjänster
Mälarenergi skall främst verka i regionen västra Mälardalen.
Mälarenergis kärnvärden är kompetens, tillförlitlighet, lyhördhet och närhet”*

Mälarenergi AB ägs utav Västerås stad och förser invånarna i Västerås med el, fjärrvärme, bredband samt fjärrkyla. Totalt distribueras 1837 GWh el under ett år till Västerås stad samt kommunerna kring Västerås (Arboga, Hallstahammar, Kungsör och Köping). Från 41 vattenkraftstationer produceras 200 GWh årligen.

3.1 Kraftvärmeverket i Västerås

Kraftvärmeverket i Västerås förser Västerås stad med omnejd med el och fjärrvärme. På kraftvärmeverket produceras 1800 GWh värme och 700 GWh el per år. Elproduktionen begränsas av värmeproduktionen, fjärrvärmebehovet måste tillgodoses. Genom att kombinera kraft och värmeproduktion kan bränslets energiinnehåll användas på bättre sätt. Verkningsgraden blir ca 90 % istället för 40 % vid enbart elproduktion (Mälarenergi AB).



Figur 3-1: Kraftvärmeverket i Västerås (Mälarenergi AB)

KVV är uppdelat i 4 stycken block, där ett block omfattar panna med turbin och generator. I Figur 3-1 ovan syns KVV i Västerås, panna 5 är den blå byggnaden.

3.1.1.1 Block 1 och 2

Block 1 och 2 är de två äldsta blocken på kraftvärmeverket, pannorna togs i drift 1963. I dag används de främst som topplast¹³. Pannorna kan båda producera 40MW_{el} och 100MW_{värme}. Bränsle till pannorna är tallbäcksolja, kol och torv.

¹³ topplast, är den last som krävs för att tillgodose energibehov större än vid normala förhållanden.

3.1.1.2 Block 3

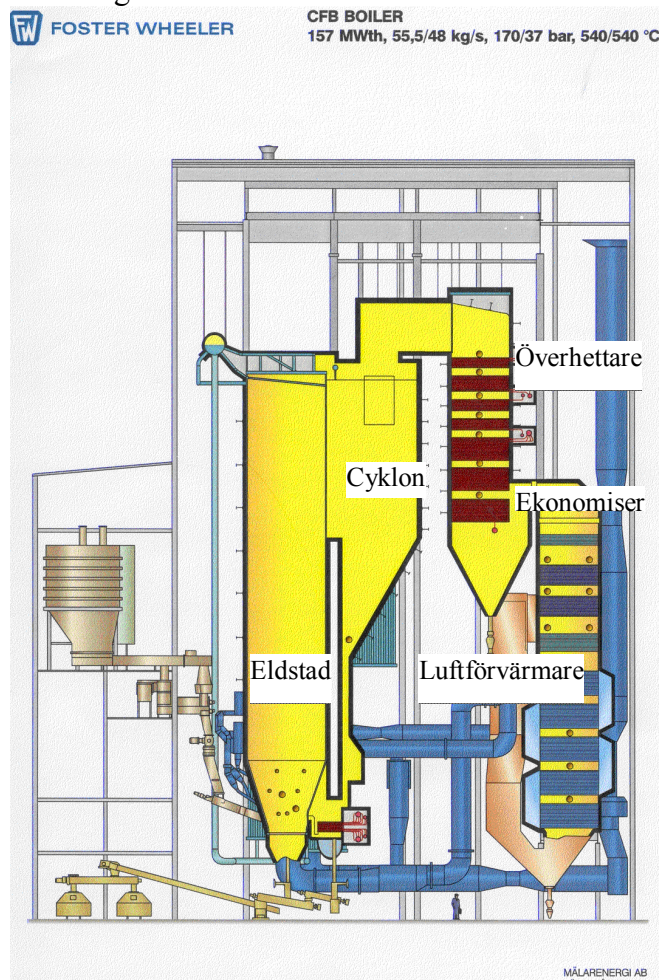
Kraftvärmeverkets enda oljepanna togs i drift 1969. Block 3 kan producera 220MW_{el} och $365\text{MW}_{\text{värme}}$ eller 250MW_{el} . Panna 3 används som topplast.

3.1.1.3 Block 4

Block 4 ser annorlunda ut än kraftvärmeverkets andra block, på block 4 är två pannor kopplade till samma turbin och generator. Panna 4 togs i drift 1973 och när panna 5 byggdes kopplades panna 5 ihop med turbinen på block 4. Tillsammans utgör panna 4 och 5 kraftvärmeverkets baslast¹⁴. Panna 4 har en årlig drifttid på 5500 timmar, de bränslen som förbränns i panna 4 är träpellets, torv, kol och tallbäcksolja. Panna 5 är i drift ungefär 8000 timmar per år, och olika typer av biobränslen förbränns i panna 5. Block 4 kan producera 155MW_{el} och $250\text{MW}_{\text{värme}}$ eller 180MW_{el} .

3.2 Panna 5

Panna 5 togs i drift 2001 därmed är kraftvärmeverkets nyaste panna. Pannverkningsgraden är 91 %, 170 MWh biobränsle behöver tillföras för att pannans termiska effekt 157 MWh ska nås. I Figur 3-2 visas en schematisk bild över Panna 5 (Mälarenergi AB).



Figur 3-2: Skiss över panna 5, kraftvärmeverket Västerås (Mälarenergi AB)

¹⁴ baslast, är den last som krävs för att tillgodose energibehov vid normala förhållanden

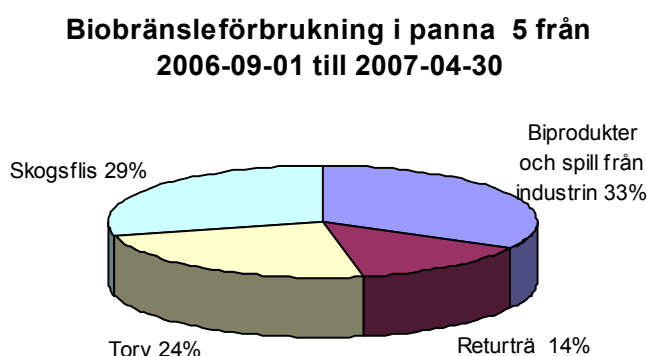
3.2.1 Bränslen i panna 5

Panna 5 är en CFB¹⁵-panna med mellantrycksöverhettning avsedd för förbränning av bibränslen. I panna 5 förbrukas ungefär 1 miljon m³ bibränsle per år.

Från september 2006 till april 2007 har följande bibränslen förbränts i panna 5:

- Skogsflis från avverkningsrester, bränsleved och stamved
- Biprodukter och spill från industrin (spån och bark etc.)
- Returträ från byggavfall etc.
- Torv (stycke- och frästorv)

Bibränslenas varierande egenskaper medför att flera olika typer av bibränslen blandas innan bränslena tillförs eldstaden. Genom att blanda bränslena kan förbränningen bli mer jämn. Är blandningen otillräcklig kan förbränningen stötvis medföra högre eller lägre temperaturer beroende på det dominerande bränslets egenskaper. Vid planering av pannans produktion används bränslerecept. Bränslerecept skrivs och byts då pannans last eller tillgången på bränsle förändras. Recepten anger antalet skopor som ska tas av ett visst bränsle, bränslena blandas sedan om i silon innan de tillförs eldstaden. Bränsleblandningen varierar under året, beroende på bränslets fukthalt, värmevärde mm. Även då receptet är konstant blir en viss variation då en skopa kan variera från gång till gång. I Bränslestatistik i panna 5 visas hur bränsleblandningen varierat under året. Fördelningen av förbrukningen av bibränslen i panna 5 under perioden som studerats visas i Figur 3-3 nedan.



Figur 3-3: Fördelning av biobränsleanvändningen i panna 5.

3.2.2 Värmeöverförande ytor i panna 5

I panna 5 finns tre högtrycksöverhettare och två mellantrycksöverhettare. För att värma luft och matarvatten innan eldstaden används luftförvärmare respektive ekonomiser.

Storleken på ytorna har betydelse för mängden värme som kan överföras från rökgaserna till mediet inne i tubrören. I Tabell 3-1 nedan visas storleken på de värmeöverförande ytorna i överhettaren och ekonomisern¹⁶.

¹⁵ CFB står för cirkulerande fluidiserande bädd.

¹⁶ Uppgift på storleken på luftförvärmarens ytor har ej funnits tillgänglig.

Tabell 3-1: Värmeöverförande delar i panna 5, ytor och placering

Värmeöverförande del	Förkortning	Area, [m ²]	Placering
Högtrycksöverhettare 1	ÖH1	963	Efter ÖH2
Högtrycksöverhettare 2	ÖH2	401/467	Efter eldstaden
Högtrycksöverhettare 3	ÖH3	173	I botten av cyklonen (intrex) ¹⁷
Mellantrycksöverhettare 1	MÖH1	3300	Efter ÖH1
Mellantrycksöverhettare 2	MÖH2	194/182	I botten av cyklonen (intrex) ¹⁷
Ekonomiser 1	ECO1	5418	Efter ECO2
Ekonomiser 2	ECO2	3386	Efter MÖH1
Luftförvärmare	LÖFÖ	- ¹⁶	Efter ECO1

De värmeöverförande ytorna varierar mellan pannans olika delar, från mindre än 200 m² i ÖH3 och MÖH2 till över 5000 m² i ECO1. Temperaturerna på rökgaserna är betydligt högre i botten av cyklonen än i slutet av rökgasstråket där ECO1 är placerad, större yta möjliggör större värmeöverföring i ECO1.

ÖH2 är placerad i rökgasstråkets övre del närmast eldstaden. Efter ÖH2 är ÖH1 placerad, det sista steget i högtrycksöverhettningen (ÖH3) är placerad i intrex. Efter ÖH1 i rökgasstråket är MÖH1 placerad. MÖH2 utgör sista steget i mellantrycksöverhettningen och även denna del är placerad i intrex. I intrex är temperaturerna mycket höga vilket är skälet till att de sista stegen i överhettningen har placerats där. I rökgasstråkets nedre del är ekonomiser och luftförvärmare placerade. Närmast efter MÖH1, är ECO2 placerad. Mellan ECO1 och ECO2 finns en katalysator för NO_x - reduktion. Längst bak i rökgasstråket är LUFÖ placerad. Placeringen av de olika delarna beskrivs närmare nedan, en skiss över panna 5 kan ses i *Figur 3-5* nedan.

I kapitel 2.2 beskrivs utformningen på de olika värmeöverförande delarna. Överhettarnas tubrör är släta rör placerade i glesa rader. I ekonomisern är tubrören placerade tätt ihop och försedda med kamflänsar för att öka ytan mot rökgaserna. I *Figur 3-4* visas bilder tagna inne i panna 5 under ett driftstopp i början av april 2007. Fotot till vänster är taget inne i rökgasstråket ovanför ÖH2, sotblåsare 3 skymtas under ÖH2s översta tubrör. Fotot till höger är taget uppifrån för att visa kamflänsarna i ECO2.



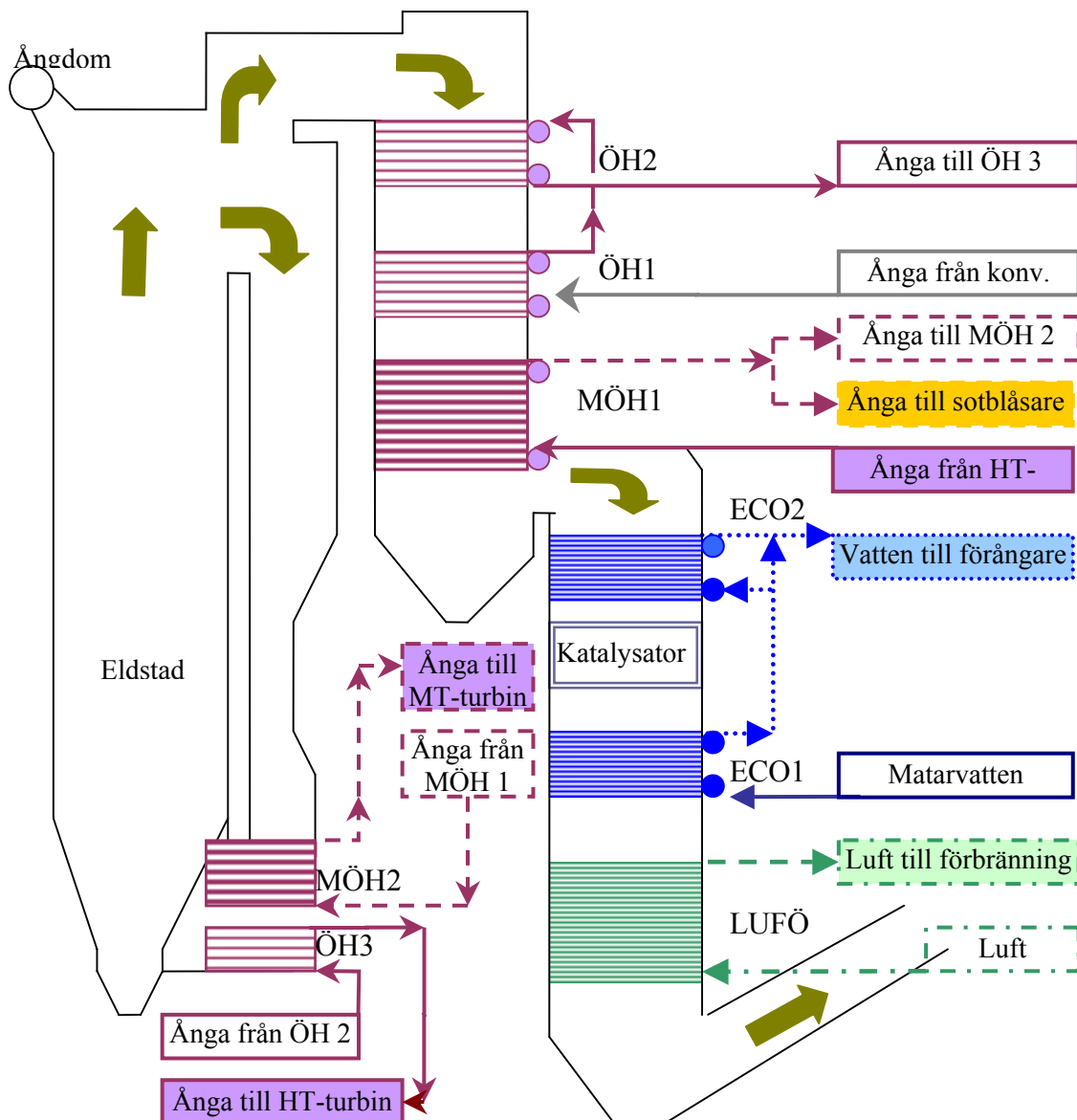
Figur 3-4: Bilden till vänster visar släta tubrör i ÖH2, till höger visas tubrör med kamflänsar i ECO2. (Foto: A. Pettersson, Mälarenergi AB, 2007)

¹⁷ Intrex står för ”integrated heat exchanger, det varma mediet består utav en blandning av rökgaser och sand.

3.2.3 Förbränning och flöden i Panna 5

Panna 5 är en CFB-panna vilket innebär att förbränningen sker i en cirkulerande fluidiserande bädden, i panna 5 består bädden av sand. Luft tillförs eldstaden underifrån för att lyfta sanden så att sanden blandas med bränslet och rökgaserna. Förbränningen blir jämn även då bränslets egenskaper varierar. Pannans last påverkas i mindre utsträckning av varierande egenskaper hos biobränslena. Rökgaser, sand och partiklar förs uppåt och i cyklonen avskiljs rökgaserna från sanden. Sanden återförs till eldstaden från botten av cyklonen.

Rökgaserna renas från stoft, NO_x och svavelhalter. Stoft avskiljs med slangfilter efter luftförvärmarna. Rökgaserna renas från NO_x med en slipkatalysator placerad mellan ECO1 och ECO2. Svavelhalterna reduceras genom att kalkstensadditiv tillsätts i sandbädden.



Figur 3-5: Skiss över panna 5 och flöden av ånga, vatten och luft

I rökgasstråket början är temperaturerna över 800°C , temperaturen är vid skorstensmynningen ungefär 35°C . Efter MÖH1 är rökgastemperaturen drygt 400°C . I ECO2 tas ungefär 100°C upp vid förvärmningen av matarvattnet, efter ECO2 är rökgasernas temperatur drygt 300°C . Då sista delen av LUFÖ passerats är temperaturen på rökgaserna 160°C . På grund av de höga

rökgastemperaturerna i ÖH2 är ångflödet riktat medströms rökgasflödet, ångan kyler därmed tubrören. I övriga överhettare är ångans flöde riktat medströms rökgasflödet

Innan matarvattnet förångas i eldstadens kokarytor förvärms det i ekonomisern. Matarvattnet når först ECO1 efter ECO1 leds vattnet vidare till tubrören i ECO2, då temperaturen är tillräcklig efter ECO1 kan ECO2 förbikopplas. Efter ekonomisern leds det uppvärmda vattnet till ångdomen. Ångdomen fungerar som en avskiljare mellan vatten och ånga. Efter ångdomen leds vattnet in i kokarytorna, utgör väggarna i eldstaden. I kokarytorna förångas vattnet och leds vidare via ångdomen till konvektionsytorna.

Efter ångan passerat genom konvektionsytorna, leds ångan vidare till ÖH1 följt av ÖH2 och ÖH3 innan ångan leds till högtrycksturbinen. När ångan passerat högtrycksturbinen har trycket reducerats och energi utvunnits, men mer energi kan utvinnas.

Ångan leds tillbaka för att överhettas på nytt i MÖH1 följt av MÖH2 innan ångan leds till mellantrycksturbinen. Efter ångan passerat mellantrycksturbinen kan antingen fjärrvärme eller el produceras. Fjärrvärmevattnet värms av ångan som när värmen avges kondenserar till vatten igen. Det nu uppvärmda fjärrvärmevattnet leds ut på fjärrvärmenätet. Vattnet som varit ånga leds tillbaka till början av processen. Vid stort elbehov leds ångan istället till lågtrycksturbinen, ångan kyls med vatten från mälaren, på detta vis kondenserar ångan till vatten. Efter lågtrycksturbinen är ångans temperatur för låg för att fjärrvärme ska kunna produceras, därmed kan inte all energi ur ångan utvinnas.

Temperaturen på ångan regleras ångan innan en värmeöverförande med insprutning, matarvatten eller en kallare ånga tillförs för att sänka temperaturen på ångan. Ångan in i tubrören kyler rökgaserna genom att temperaturskillnaden mellan ånga och rökgaser är större. Temperaturen på ångan in i överhettare 2 mäts efter den plats där insprutning görs. Då värmeöverföringen avtar så ökar temperaturen på ångan in i överhettaren, men den utgående temperaturen ändras ej nämnvärt. Insprutningen minskar så att ångans utgående temperatur ska nå samma värde även vid sämre värmeöverföring. Detta påverkar även rökgasernas temperatur då den sänks vid ökat värmeupptag.

3.2.4 Beläggningar i panna 5

I överhettarstråket är temperaturen höga och de partiklar som fastnar på tubytorna har en benägenhet att bilda hårda beläggningar. En del av beläggningarna kan avlägsnas med sotblåsning, men det bildas ett lager som är svårt att helt rengöra med sotblåsningen, därmed försämras värmeöverföringen genom tuberna under driftsäsongen. Beläggningarna fäster främst på sidan rökgaserna möter först (Sandberg J., 2007).

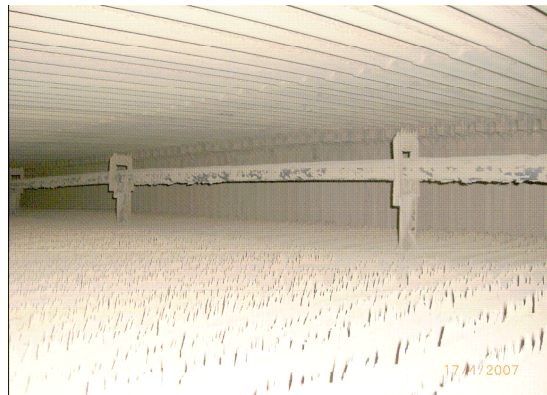
I Figur 3-6 visas beläggningar som bildats på det första tubpaketet i överhettare 2. Bilden är tagen 17:e april 2007, pannan har då varit i drift i drygt 6 månader. Beläggningstillväxten på tubrören i de paket placerade nedanför är något mindre, då de översta tubraderna nås första av partiklarna. Mer om beläggningarnas påverkan på värmeöverföringen visas i kapitel 4.



Figur 3-6: Beläggningar på tubrör i ÖH2 (Foto: A Pettersson, Mälarenergi AB, 2007)

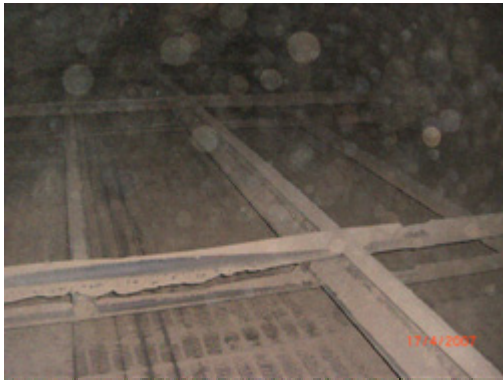
3.3 Sotningssystemet i panna 5

Ångsotning används för rengöring av de värmeöverförande ytorna i panna 5 under drift. I rök-gasdraget är 32 ångsotblåsare installerade, två olika modeller av sotblåsare används i panna 5. För rengöring av överhettarpaket, samt luftförvärmare används totalt 24 stycken roterande utdragbara sotblåsare av halvslagstyp. I katalysator och ekonomiser används fastsittande krattsotblåsare. Krattsotblåsare är formade som "T" med dysor placerade utåt sidorna så att spridningen blir så stor som möjligt. Denna typ medför att ångan får mindre tryck men ger bättre spridning än med raka lansar. Raka lansarna med mindre antal dysor ger större rengöringseffekt mot hårdare beläggningar, därmed är de vanliga i överhettarna.



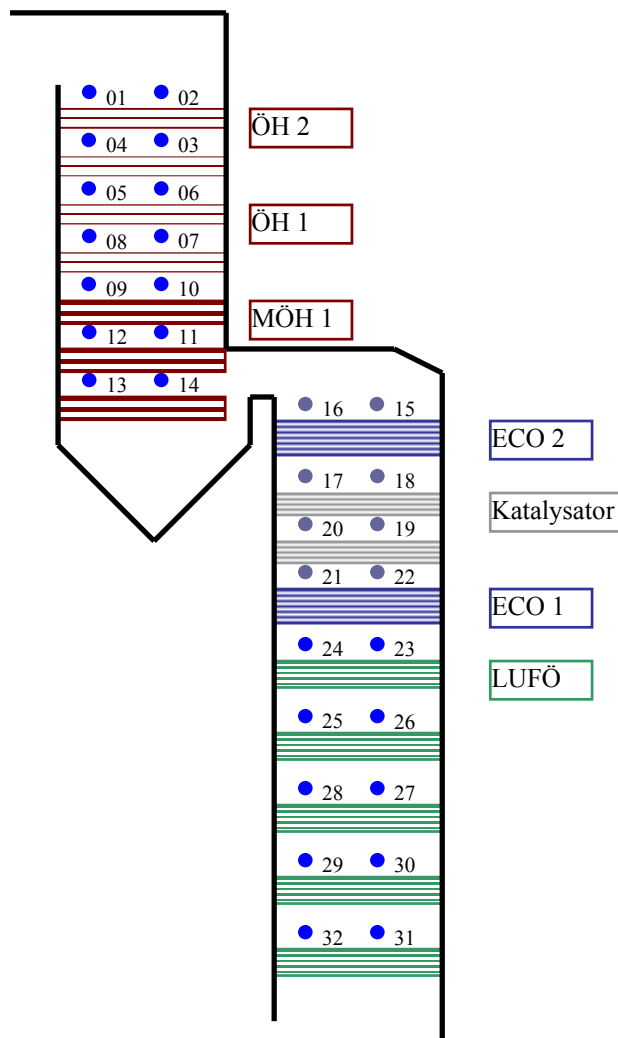
Figur 3-7: Sotblåsare i panna 5, placerade i överhettardelen (Foto: till vänster Mälarenergi AB, 2001, till höger A. Pettersson, Mälarenergi AB, 2007)

I Figur 3-7 ovan visas lansen på sotblåsare av roterande utdragbar modell. Bilden till höger är tagen då pannan är ren, inga beläggningar. Till vänster visas bild på en sotblåsare då pannan varit i drift i drygt 6 månader, ett lager av beläggningar sitter fast på tubrören, trots sotblåsning. Längst fram på lansen syns en av dysorna. Då sotblåsaren är i drift roterar lansen och sprider därmed ånga runt hela ytan. Sotblåsaren består av ett ångrör som skjuts in i pannan med hjälp av en motor, monterad på utsidan av pannan. Under sotningen leds ånga in i ångröret för att under högt tryck blåsas ut genom dysor placerade längs med ångröret. Då ångröret roterar sprids ångan över de ytor som angränsar sotblåsaren.



Figur 3-8: Krattsotblåsare i ekonomiser 2

Placeringen av sotblåsarna visas i Figur 3-9. Där illustreras sotblåsarnas placering med prickarna. Mellan varje tubrörspaket är två sotblåsare placerade. Ovanför tubrören i överhettare 2 och överhettare 1 är 4 stycken sotblåsare installerade.



Figur 3-9: Placeringen av sotblåsarna och de värmeöverförande ytorna i panna 5s rökgasstråk

Mellanöverhettare 1 som är uppdelad i tre paket rengörs med 6 stycken sotblåsare, två till varje delning. Till sekvensen med ekonomiser och katalysator finns 8 stycken sotblåsare av krattmodell installerade, där fyra sotblåsare rengör ekonomiserpaketen och 4 stycken rengör katalysatorn. Till luftförvärmarens fem delar används 10 stycken sotblåsare. Samtliga sot-

blåsare är kopplade till en gemensam ånglinje, detta medför att endast en sotblåsare kan vara i drift i taget. Ångan räcker inte för fler än en sotblåsare åt gången. Sotångan tas från samlingslådan efter mellanöverhettare 1. Samlingslådan är ett ångrör med större dimensioner än tubrören inne i pannan, i samlingslådan mynnar den överhettade ångan från respektive del ut. Därmed har sotningsången samma tryck och temperatur som den utgående ångan från mellanöverhettare 1. Sotångan kan tryck och temperaturreglaras innan sotblåsarna så att rätt tryck och temperatur fås på sotningsången

3.3.1 Sotningssekvensen

Sotningen i panna 5 aktiveras manuellt av driftpersonal i kontrollrummet. Innan sotningssekvensen påbörjas väljs de sotblåsare som ska aktiveras i den kommande sotningssekvensen. Då sotningssekvensen startar aktiveras sotblåsarna uppifrån och ner (vertikal sotblåsning). För att sotningen ska kunna genomföras krävs följande:

- Tillräcklig temperatur, sotningsången ska nå upp till 300°C för att sotning ska startas
- Tillräckligt tryck, då den inkommande ångan har tryck över 25bar regleras trycket ner.
- Att pannskyddet har signalen OK
- Att sotångventilen är öppen och dräneringsventilen stängd.

Sotblåsaren som aktiverats lämnar sitt yttre läge, rengör ytorna i pannan tills det inre läget nås och sotblåsaren återvänder och rengör ytorna på vägen tillbaka ut ur pannan. Tiden för detta tar ungefär 3 minuter, närmare statistik visas i avsnitt 4.2 nedan.

Innan sotningssekvensen påbörjas värms ånglinjerna upp för att undvika att sotningsången kondenserar och för med sig kondensat in i pannan. Ångflödet till sotblåsarna regleras genom att en ventil öppnas då sotblåsaren lämnar sitt yttre läge för att påbörja sotningen, då sotblåsaren återvänder till sitt yttre läge stängs ventilen och nästa sotblåsare aktiveras. Detta är viktigt för att sotblåsarlansen inte ska kunna vara inne i pannan utan att ha sotningsånga som kylning. Om lansen skulle fastna inne i pannan och ångflödet skulle stängas av så är risken stor för att lansen skadas av de höga temperaturerna (Ölvebo F., 2007).

Ångflödet till sotblåsarna beror av trycket på sotningsången (mellanöverhettarången). Det finns ingen individuell reglering för de enskilda sotblåsarna, samma tryck och flöde används för alla sotblåsare. Tiden för sotblåsarna att ta sig från det inre läget i pannan till det yttre normala läget varierar kring en minut och en och en halv min. Tiden för sotblåsarna är inte reglerad men beror på typ av sotblåsare och kan variera något från sotblåsare till sotblåsare. Sotning sker idag med olika intervall, normalt sotas hela pannan en gång per dygn. Då aktiveras samtliga sotblåsare. Med undantag om någon är trasig. Då den bakre delen tenderar att bygga på beläggningar snabbare sotas denna del ytterligare en gång per dygn.

Mer statistik för sotningen visas i avsnitt 4.2 nedan.

4 Resultat

Fokus har lagts på att ta fram och analysera statistik för hur sotning sker och påverkar värmeöverföringen i pannans olika delar. Kartläggning av hur sotning sker, förbrukning av sotningsånga, samt vilka sotningsintervall som används har varit tyngdpunkten i arbetet. För överskådligheten har en del resultat placerats i bilagor, se hänvisningar nedan. Resultatet visas i följande avsnitt:

- 4.2 Statistik för sotning
- 4.3 Beräkning av kostnad för sotning
- 4.4 Driftdata
- 4.5 Sotningstest
- 4.6 Betydelsen av sotning och sotningsintervall

4.1 Studerade mätvärden

Tidsperioden som har studerats är från det att panna 5 togs i drift efter sommarrevisionen den 24:e september 2006 fram till den 30:e april 2007. Perioden omfattar 219 dagar, totalt 5256 timmar.

Mätvärden från driftdata samlas in momentant från pannan, värden som ej mäts direkt inne i pannan beräknas fram utifrån uppmätta värden. Driftdata äldre än två veckor lagras som ett medelvärde för varje timme. Vid analys av driftdata för hela perioden har tim-medelvärden använts. Under ett par dygn har även momentana mätvärden samlats var 10:e sekund, för analys av förändringar i värmeöverföringen under och direkt efter sotningstillfället.

Driftdata som studerats är följande:

- Rökgastemperaturen [$^{\circ}\text{C}$]. Mätplatser finns på olika platser i rökgasstråket före ÖH2, efter MÖH1, efter ECO1 samt efter LUFÖ.
- Ångtemperatur i överhettarna (ÖH2, ÖH1, MÖH1) [$^{\circ}\text{C}$]. Mätning sker innan ångan leds in i överhettaren, men efter insprutningen och efter ångan passerat genom tubrören i överhettaren.
- Värmeöverföring [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] och [%]. Både U-värdet och det relativa U-värdet beräknas fram av uppmätta värden för beräkningar se Bilaga A Samband för värmeöverföring. Värdet för det relativa U-värdet påverkas ej lika starkt av rökgastemperaturen som ”vanligt” U-värde gör. Därför analyseras främst det relativa U-värdet.
- Effekt [MW]. Effekten beräknas för samtliga överhettare och en sammanlagd effekt för ekonomiserns båda delar.
- Flöde på sotningsångan [ton/h].

4.1.1 Avgränsningar och antaganden

För att minska variationerna i mätvärdena och studera mer liknande förhållanden har värden då panna 5 ej går med full last sorterats bort, dvs mätvärden för de timmar då pannans last är mindre än 150MW tas ej med i studien.

Driftdata analyseras för samtliga överhettare i rökgasstråket samt ekonomiserns och luftförvärmarens delar. ÖH3 och MÖH2 studeras ej närmare då ytorna ej sotas när pannan är i drift. Slitage kan uppstå på ytorna till tubrören om alltför täta sotningsintervall används. I instruktionerna för sotblåsarna finns förslag på att sotning kan ske 1-3 gånger per dygn. Tätare

sotningsintervall än 8 timmar studeras ej närmare då risken för påfrestningar på tubrören antas bli alltför stor.

Sotblåsare som varit ur funktion antas förbruka samma mängd ånga som övriga sotblåsare i samma värmeöverförande del. Vid jämförelse av förbrukning av sotningsånga för olika sotningsintervall antas samtliga sotblåsare vara hela och aktiverade.

Vid beräkning av kostnad för förbrukning av sotningsånga antas kostnad för ångan vara 300 kr/MWh. (Holmén E., 2007).

4.2 Statistik för sotning

Antalet aktiva sotblåsare vid en sotningssekvens varierar under perioden, då sotblåsare valts bort eller ej kunnat utföra hela sotningen. Ett antal sotblåsare har ej kunnat användas under perioden på grund av skador mm. Den totala tiden för sotning i panna 5, antalet sotningar och sotblåsare samt förbrukningen av sotningsånga för pannans delar visas i Tabell 4-1 nedan.

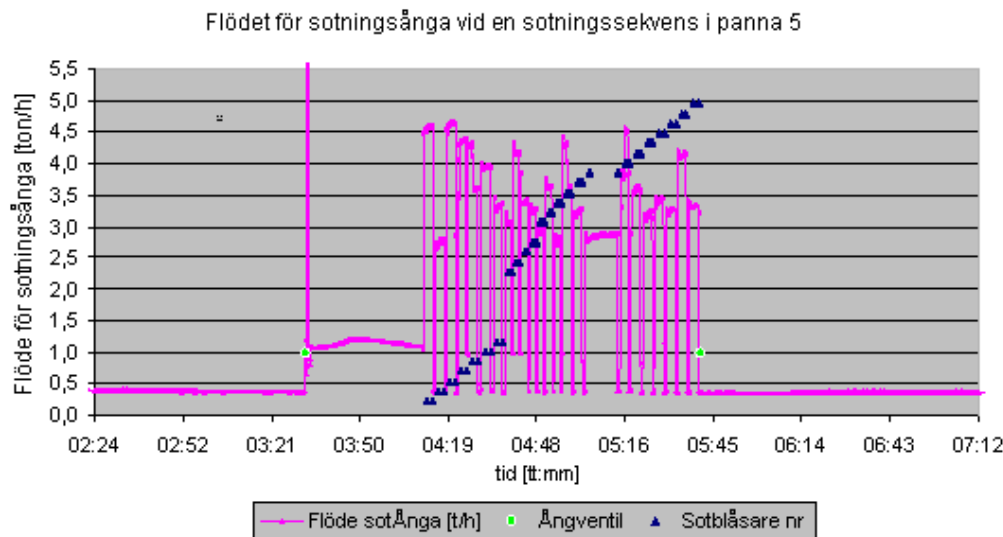
Tabell 4-1: Statistik för sotning i panna 5 under perioden

Sotningsstatistik	ÖH2	ÖH1	MÖH1	ECO	LUFÖ	Totalt
Antal sotningar	195	180	175	290	300	310
Antal sotblåsare	4	4	6	8	10	32
Ångförbrukning [ton]	110	115	170	200	570	1 165
Tid för sotning [h]	31	33	48	79	164	355

Totalt har 1115 sotningar utförts i panna 5 under perioden. Vanligen sotas alla eller flera delar samtidigt vilket medför att antalet sotningstillfällen varit färre än antalet sotningar. Totalt har 309 sotningssekvenser utförts under perioden. Förbrukningen av sotningsånga har varit 1145 ton. Om samtliga sotblåsare varit aktiva vid varje sotningstillfälle hade 1288 ton ånga förbrukats.

Förbrukningen av sotningsånga beror på vilken typ av sotblåsare som används. Sotblåsare med raka roterande lansar i överhettare och luftförvärmare har en genomsnittlig tid för en sotning från start till slut på drygt tre minuter. I genomsnitt förbrukas 0,18 ton sotningsånga per sotblåsare. För krattsotblåsare i ekonomisern varar sotningen under drygt två minuter. Förbrukningen av sotningsånga är i genomsnitt 0,13 ton per sotblåsare. Tider och förbrukning varierar något mellan sotblåsare och sotningstillfälle, mer detaljerade siffror sotblåsare i olika delar av pannan kan ses i Bilaga C Sotningsstatistik.

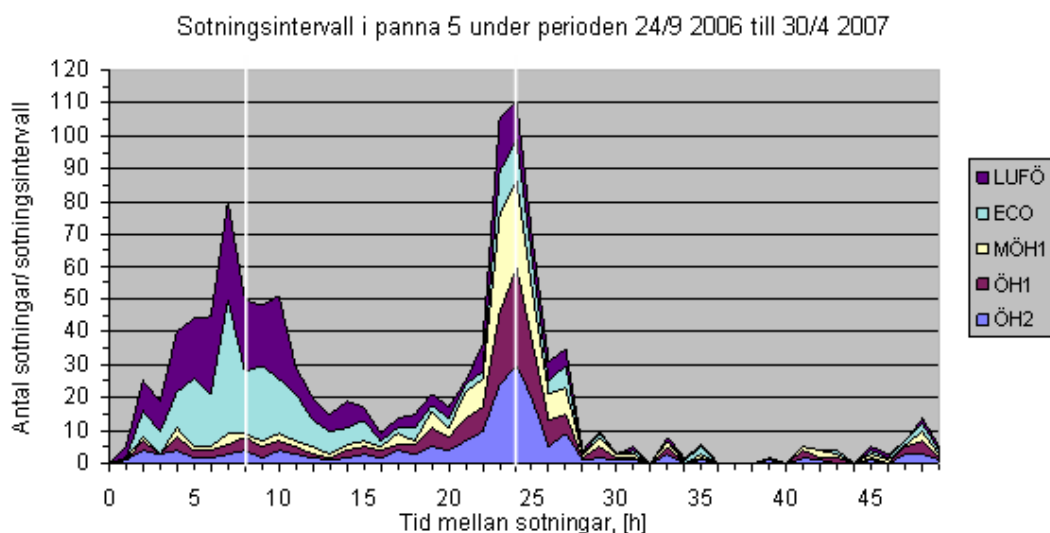
Beskrivning av hur sotningsångans flöde varierar under en sotningssekvens visas i Figur 4-1. Blå punkter visar när olika sotblåsare påbörjar respektive avslutar sotningen. Mellanrummet i mitten av de blå punkterna beror på att just vid denna sotningssekvens har sotblåsarna i MÖH1 ej aktiverats av drifttekniska skäl. Sotningsångans flöde varierar under sotningssekvensen. Då sotblåsarna är aktiva och sotningen utförs varierar flödet mellan 2,7 ton/h och 4,4 ton/h, medelvärde under perioden är 3,4 ton/h. Flödet sjunker ner till grund nivån på 0,5 ton/h under tiden mellan sotblåsarnas aktivering.



Figur 4-1: Flödet för sotningsången under en sotningssekvens i panna 5.

Innan sotningen påbörjas sker uppvärmning av ångledningarna, vilket visas som en ökning av sotningsångans flöde från 0,5 ton/h till ungefär 1,1 ton/h, flödet varierar mellan 0,7 ton/h och 1,2 ton/h. Förbrukningen av sotningsånga under uppvärmningen är vanligen större än förbrukningen vid själva sotningen eftersom tiden för uppvärmningen är mycket längre även då flödet är lägre.

Variationen av sotningsintervall för pannans olika delar kan ses i Figur 4-2 nedan. Där visas antalet sotningsintervall med en viss täthet för överhettare, ekonomiser och luftförvärmare. Antalet sotningar i LUFÖ vid olika sotningsintervall visas i den översta kurvan, därefter visas sotningar i ECO, MÖH1, ÖH1 och längst ner ÖH2. Sotningsintervall vid 8 respektive 24 timmar visas i figuren med vita streck.



Figur 4-2: Översikt över sotningsintervall i panna 5 under perioden

Det vanligaste sotningsintervallet i överhettarna är 24 timmars intervall. I ekonomiser och luftförvärmare är de vanligaste sotningsintervallen kring 8 timmar, vilket visas i Tabell 4-2.

Tabell 4-2: Fördelning av sotningsintervall i pannans olika delar

Fördelning av sotningsintervall	ÖH2	ÖH1	MÖH1	ECO	LUFÖ
~ 8 timmar	10 %	10 %	7 %	52 %	48 %
~ 16 timmar	10 %	10 %	9 %	10 %	10 %
~ 24 timmar	54 %	54 %	60 %	17 %	18 %
~ 48 timmar	5 %	6 %	5 %	2 %	2 %
Antal sotningar	196	181	174	292	300

Närmare hälften av sotningarna i luftförvärmare och ekonomiser sker vid sotningsintervall kring 8 timmar. För överhettarna sker flest sotningar vid sotningsintervall kring 24 timmar.

4.2.1 Diskussion kring statistik för sotning

Tiden då sotning utförts och förbrukningen av sotningsånga varierar stort för pannans olika delar. Anledningen till skillnaden beror på:

- Antalet sotblåsare i delarna är olika. Sotning utförs under längre tid då 10 sotblåsare används (LUFÖ) jämfört med då 4 sotblåsare används (ÖH1 och ÖH2). Har dessutom en sotblåsare varit trasig i överhettarna blir skillnaden ännu större.
- Tiden för sotningen är olika för krattsotblåsare(i ECO) och för raka sotblåsare (övriga delar). En sotning för en krattsotblåsare tar drygt 2 minuter, jämfört med övriga sotblåsare där en sotning tar drygt 3 minuter.
- Sotningsintervallet i de olika delarna har varit varierat under perioden. I LUFÖ och ECO har hälften av alla sotningarna skett med 8timmars intervall, medan i ÖH2, ÖH1 och MÖH1 har hälften sotningarna skett med 24timmars intervall. Därmed blir antalet sotningar som utförts i LUFÖ och ECO fler än antalet utförda sotningar i överhettarna.

Som visas i Figur 4-1 sker förbrukning av sotningsånga endast då sotblåsarna är aktiva och utför sotningen. Förbrukningen av sotningsånga har beräknats för varje sotblåsare utifrån tid för varje sotning samt flöde av sotningsånga vid varje sotningstillfälle.

Aktivering av sotningen sker manuellt, vilket medför att intervallen för sotningen varierar något beroende på den mänskliga faktorn samt övriga driften. Därmed räknas ett sotningsintervall som 8 timmar även om tiden mellan sotningarna sker med 6 eller 10 timmars mellanrum. Variationen kan ses i Figur 4-2 för pannans olika delar.

4.3 Beräkning av kostnad för sotning

Vid sotning åtgår ånga dels till själva sotningen och dels till uppvärmning av de ledningar där sotningsångan leds till sotblåsarna. Kostnaden för en sotning beror på mängden ånga som förbrukas under sotningstillfället samt kostnaden för att värma matarvattnet till temperaturen som sotningsångan har. Mängden ånga som förbrukas under en sotningssekvens beror på ångans flöde, ångans temperatur samt tiden som sotningen varar. För att beräkna den totala kostnaden för sotningen i panna 5 behövs antalet sotningar samt kostnaden för uppvärmning av ångledningen inför sotningssekvensen.

4.3.1 Kostnad för sotningsånga

Sotningsången i panna 5 hämtas från samlingslådan efter MÖH1. Ången har där tryck mellan 20 och 30 bar, medeltrycket vid full last är 28 bar. Temperaturen varierar mellan 460°C och 490°C, medeltemperaturen är kring 473°C. Kostnad för ången är 300 kr/MWh, se 4.1.1 ovan.

Energiinnehåll för matarvatten vid 25°C är ungefär 100 kJ/kg. Energiinnehållet för vattenånga med temperatur på ca 470°C och tryck på 28 bar är 3390 kJ/kg. Den mängd energi som tillförts ången är differensen mellan energiinnehåll i matarvatten och den överhettade ången, 3290 kJ/kg ånga, eller 0,914 kWh/kg.

- Kostnaden för sotningsånga är 274 kr per ton ånga.

4.3.2 Kostnad för uppvärmning

Inför varje sotning sker uppvärmning av den ångledning sotningsången leds i för att ången inte ska kondensera ut i de kalla ledningarna och föra med sig kondensat in i pannan. Uppvärmningen avslutas då temperaturen i ledningen nått 300°C. Tiden för uppvärmning varierar beroende på ångans tryck och temperatur.

Uppvärmning av ångledningarna har studerats för att se om tiden för uppvärmning och därmed ångförbrukningen påverkas av sotningsintervallen. Några tydliga samband har inte kunnat ses mellan tid för uppvärmning och tiden mellan sotningstillfällen. Efter avslutad sotning avtar ångflödet genom ledningarna som kyls snabbt. Vid sotningsintervall på mindre än en timma, har tiden för uppvärmning varit något kortare eftersom ledningarna inte kylts ner helt mellan sotningarna. Tiden för uppvärmning varierar från 20 minuter till 60 minuter, där genomsnittstiden är ungefär 28 minuter. I genomsnitt är sotningsångans flöde under uppvärmningen är 1,1 ton/h, förbrukningen är 0,52 ton sotningsånga och kostnaden per uppvärmning är 143 kr. Under periodens 309 sotningstillfällen förbrukas totalt 162 ton sotningsånga under uppvärmningen.

- Kostnaden för uppvärmning av ångledningarna under perioden är 44 000 kr.

4.3.3 Kostnad för verklig sotning under perioden

Under sotningen varierar sotningsångans flöde som beskrevs ovan, genomsnittligt flöde för sotningsången är 3,45 ton/h då sotblåsarna är aktiverade under sotningstillfället. I Tabell 4-3 visas ångförbrukningen och kostnad för sotningen under perioden.

Tabell 4-3: Förbrukning av och kostnad för sotningsånga i panna 5

Förbrukning av sotningsånga	ÖH2	ÖH1	MÖH1	ECO	LUFÖ	Totalt
Ton ånga	110	115	170	270	570	1 222
MWh	97	103	151	248	518	1 117
Kostnad [kr]	29 000	31 000	45 000	75 000	155 000	335 000

Antalet sotblåsare påverkar naturligtvis den värmeöverförande delens förbrukning av sotningsånga och därmed kostnaden. Inte helt oväntat är den största förbrukningen och kostnaden i LUFÖ, och den minsta i ÖH2 och ÖH1. Totalt har 1 222 ton sotningsånga förbrukats under perioden.

- Kostnaden för sotningen under perioden är 335 000 kr.

4.3.4 Kostnad för beräknad sotning under perioden

Under perioden har en del av sotblåsarna ej fungerat felfritt, några har varit trasiga och ej aktiverats under perioden. Förbrukningen av sotningsånga om samtliga sotblåsare aktiverats och fungerat felfritt under perioden har beräknats för att ge en total förbrukning för perioden.

Tabell 4-4: Förbrukning av och kostnad för sotningsånga i panna 5

Förbrukning av sotningsånga	ÖH2	ÖH1	MÖH1	ECO	LUFÖ	Totalt
Ton ånga	130	137	176	300	546	1 288
MWh	119	125	161	274	499	1 177
Kkr	36	38	48	82	150	354

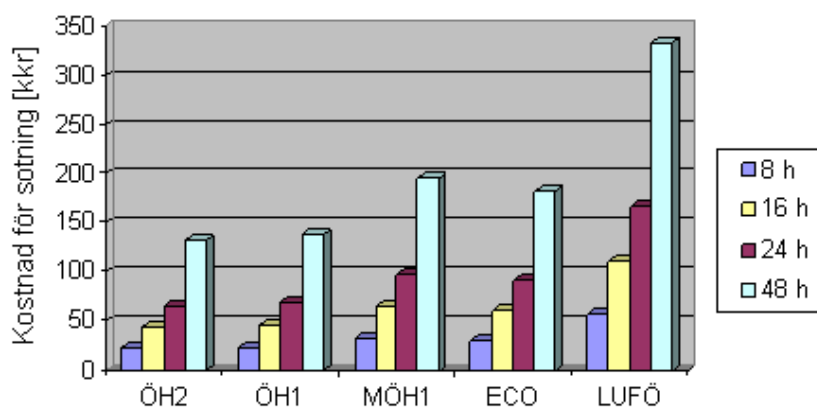
Förbrukning och kostnader har uppskattats för perioden om samtliga sotblåsare varit hela, till totalt nära 1 300 ton sotningsånga.

- Kostnaden för sotningen under perioden blir 354 000 kr.

4.3.5 Kostnad för olika sotningsintervall

Kostnaden för och förbrukningen av sotningsånga har beräknats för sotningsintervall på 8, 16, 24 samt 48 timmar. Kostnaden ökar med tätheten på sotningsintervallen i och med att antalet sotningar blir fler under perioden. Sammanställning för förbrukning och kostnad vid olika sotningsintervall visas i Tabell (C-1) och Tabell (C-2) i Bilaga C. I Figur 4-3 nedan visas kostnaden för sotning vid olika sotningsintervallen i pannans delar. Staplarna visar kostnaden för sotning vid sotningsintervall på 48, 24, 16 respektive 8 timmar.

Kostnad för sotning vid olika sotningsintervall i panna 5



Figur 4-3: Kostnad för sotning vid olika sotningsintervall i panna 5

Sotningskostnaden ökar med ökad täthet på sotningsintervallen. Sotning på 8 timmar i överhettarna medför en sammanlagd kostnad på 462 kkr, 24 timmars intervall kostar 154 kkr. Sotningsintervall på 8 timmar i överhettarna kostar ungefär 308 kkr mer än sotningsintervall på 24 timmar. För ECO och LUFÖ är sotningskostnaden vid 8 timmars intervall 514 kkr, 24 timmars intervall kostar 171 kkr. Sotningsintervall i ECO och LUFÖ på 8 timmar kostar 343 kkr mer än sotningsintervall på 24 timmar.

4.3.6 Diskussion kring kostnad för sotning

Sotningsånga förbrukas under uppvärmningen inför sotningstillfället samt under själva sotningen. Sotningsånga som åtgår till uppvärmningen påverkas inte av sotningsintervallet annat än om mycket täta intervall används, på mindre än 1h. Avsvalningen av ångledningarnas temperatur ner till rumstemperatur går snabbt. Därmed minskar inte uppvärmningskostnaden vid tätare sotningsintervall. Uppvärmningskostnaden påverkas av antalet sotningstillfällen, temperaturen på ångledningarna samt sotningsångans flöde.

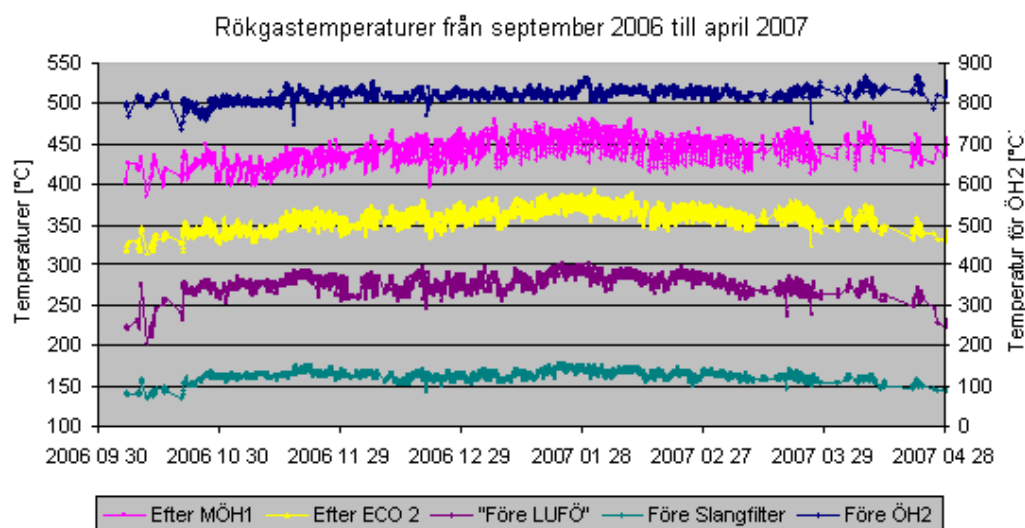
Mängden sotningsånga som förbrukas under sotningen förbrukas endast då sotblåsarna är aktiverade och sotning utförs. Kostnaden för sotningen påverkas av antalet aktiverade sotblåsare och antalet sotningstillfällen.

Kostnaden för uppvärmningen är större än kostnaden för sotning i ÖH1 och ÖH2. Flödet under uppvärmningen är betydligt lägre än under själva sotningen men tiden är längre för uppvärmningen än sammanlagt för alla sotningar under perioden i ÖH1 respektive ÖH2.

Under perioden har olika täta sotningsintervall förekommit i pannans delar, detta visas i avsnitt 4.2 ovan. I överhettarna har de vanligaste sotningsintervallen varit kring 24 timmar, medan intervall på 8 timmar varit vanligare i ekonomiser och luftförvärmare. Sotning i MÖH1 är mer kostsam än sotning i ECO. Antalet sotblåsare i ECO är färre än i MÖH1, men tiden för sotningen är kortare i ECO än i MÖH1 vilket medför att mer sotningsånga förbrukas i MÖH1.

4.4 Driftdata

I detta avsnitt visas trender för värmeöverföring, temperaturer och effekter under den studerade perioden för de olika värmeöverförande delarna i panna 5. Först ges en översiktlig bild, därefter ges mer ingående beskrivning av trender för varje enskild del. Rökgasernas temperaturer på olika platser i panna 5 visas i Figur 4-4.



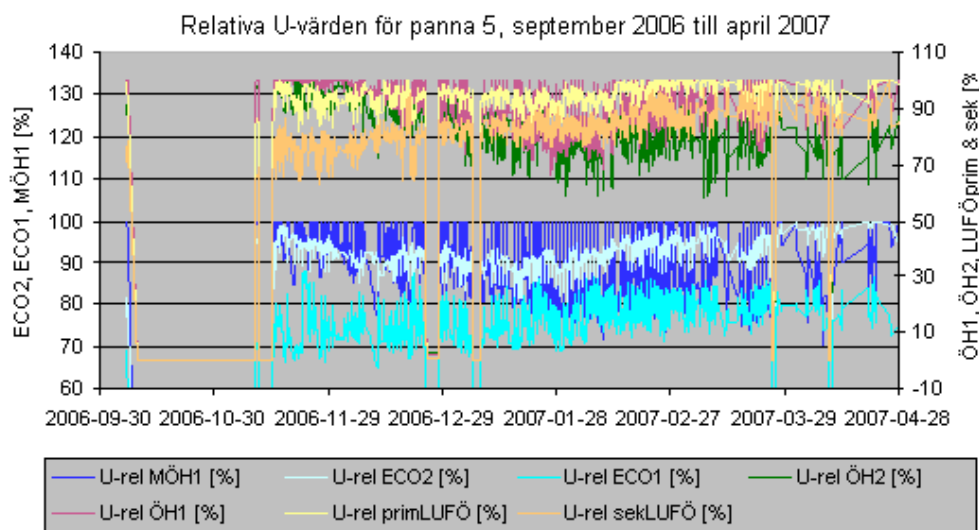
Figur 4-4: Rökgastemperaturens förändring från september 2007 till april 2006

Temperaturen på rökgaserna ovanför ÖH2 visas på sekundäraxeln, kurvan är den översta i figuren. Övriga temperaturer för rökgaserna visas på primäraxeln. Rökgastemperaturen efter MÖH1 visas i kurvan näst högst, kurvan nedanför visar rökgastemperaturen efter ECO2, den

fjärde kurvan visar rök Gastemperaturen före LUFÖ och kurvan längst ner visar rök Gastemperaturen före slangfiltret, dvs efter LUFÖ.

Rök Gasernas temperatur är som högst ovanför ÖH2, där är medeltemperaturen drygt 800°C. Efter MÖH1 är rök Gastemperaturen ungefär 450°C, ångan i överhettarna har tagit upp ungefär 400°C. Efter ECO2 varierar temperaturen mellan 330°C och 380°C, ungefär 100°C tas upp i ECO2. Rök Gastemperaturen före LUFÖ varierar mellan 250°C och 300°C. Efter LUFÖ är rök Gasens temperatur ungefär 160°C innan rök Gaserna når slangfiltret, nära 200°C tas upp i luftförvärmarna.

Värmeöverföringens förändring under perioden visas i Figur 4-5. Kurvorna som kan ses visar uppifrån och ner värden för MÖH1, ÖH1, ÖH2, ECO2, ECO1, LUFÖprim samt LUFÖsek. På primäraxeln visas värden för värmeöverföringen i ECO och LUFÖ, i %. På sekundäraxeln visas värden för värmeöverföring i ÖH1, ÖH2 samt MÖH1, i %.

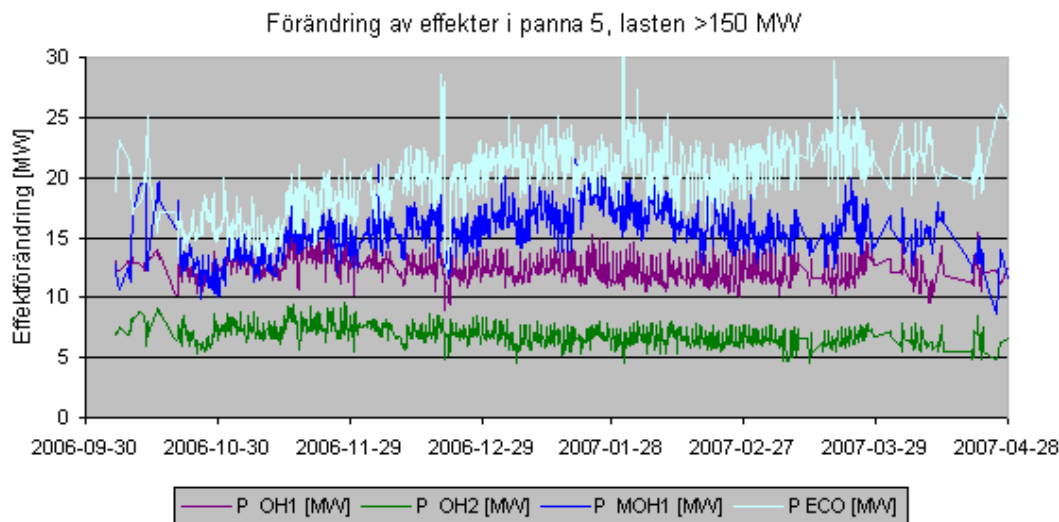


Figur 4-5: Relativa U-värden för de värmeöverförande ytorna i panna 5.

Trenden som kan ses för värmeöverföringen i Figur 4-5 är för överhettarna avtagande, medan det för ekonomisern och luftförvärmaren visar på en ökande trend. Då värmeöverföringen minskar i en av delarna ökar värmeöverföringen något i delarna nedanför i och med att rök Gasernas temperaturs blir högre efter den första delen än tidigare.

I Figur 4-6 visas förändringen av effekt i överhettare och ekonomiser under perioden¹⁸. Ekonomiserns effekt är ett totalt värde för ekonomiserns båda delar. Kurvan överst i figuren visar effekten för ekonomisern, därefter ses effekten för MÖH1 följt av effekten för ÖH1 och slutligen längst ner visas effekt för ÖH2.

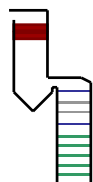
¹⁸ Effekten mäts ej i LUFÖ, därmed finns inga driftdata för denna del.



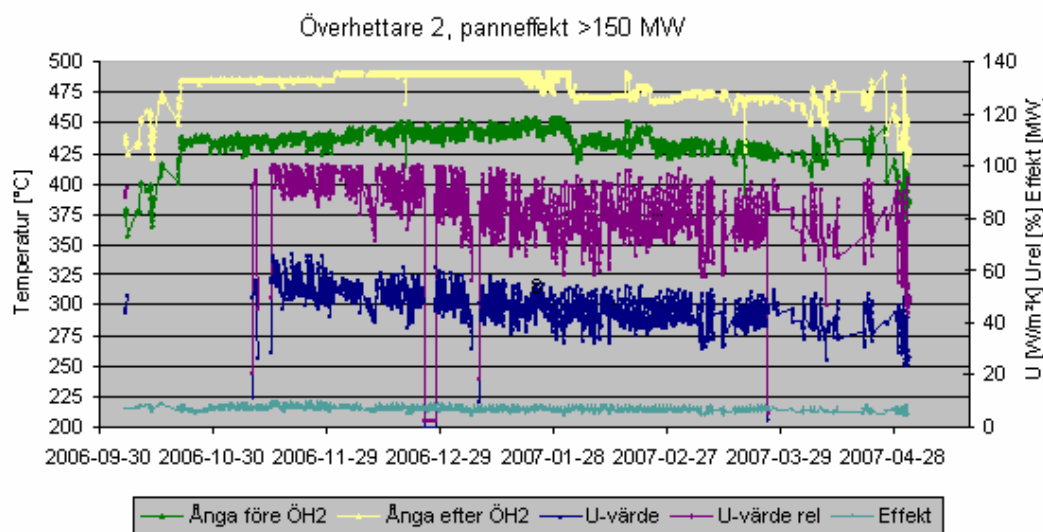
Figur 4-6: Förändring av effekten från de värmeöverförande paketen som sotas i panna 5.

Trenden för effekten är något avtagande för ÖH2 och ÖH1. I MÖH1 ökar effekten i början av perioden, för att sedan börja avta. För ECO pekar trenden snarare på ett ökande effektupptag, en liten svacka i början av mars, men sedan sker en ökning igen. För beskrivning av hur förändringar i värmeöverföring, effekt samt temperaturer under perioden ser ut för de olika värmeöverförande ytorna i panna 5 visas nedan figurer för respektive del. Först visas driftdata för överhettare 2, då ÖH2 är den värmeöverförande del som är placerad övers i rökgasstråket.

4.4.1 Driftdata för överhettare 2



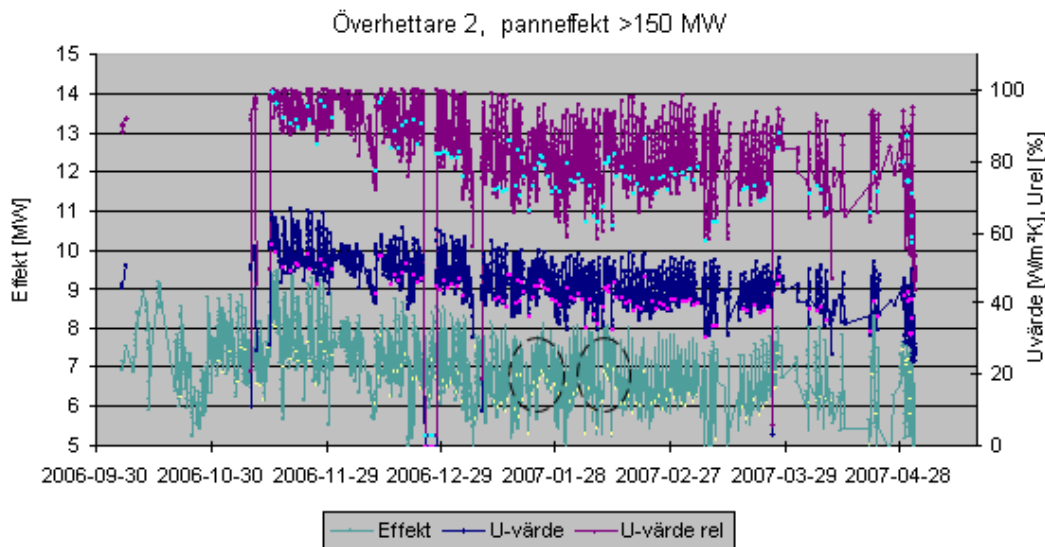
I Figur 4-7 visas trender för värmeöverföring och effekt i ÖH2, samt ångans temperaturer före och efter ÖH2. Förändringen i värmeöverföring och effekt visas på sekundäraxeln och på primäraxeln visas temperaturer. Översta kurvan i figuren visar ångans temperatur efter ÖH2 följt av ångans temperatur före ÖH2, efter insprutningen. Därefter visas kurvor för värmeöverföringen.



Figur 4-7: Driftdata för ÖH2, från september 2006 till april 2007.

Längst ner i figuren visas effektens förändring under perioden. De förändringar som kan ses i ÖH2 under perioden är att ångans temperatur ökar från 425-450°C innan ÖH2 till ungefär 475°C efter ÖH2. Värmeöverföringen minskar med 20 %. Effekten varierar mellan 6 och 9 MW även här ses en viss minskning under perioden.

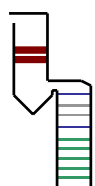
För att närmare kunna se förändringarna för värmeöverföring och effekt i ÖH2 visas i Figur 4-8 enbart dessa kurvor. De två översta kurvorna visar relativt U-värde respektive U-värde längst ner visas effekten. Primäraxeln visar effekt i MW och sekundäraxeln visar värmeöverföring i % och W/m²K.



Figur 4-8 Förändring av U-värde, relativt U-värde och effekt i ÖH2

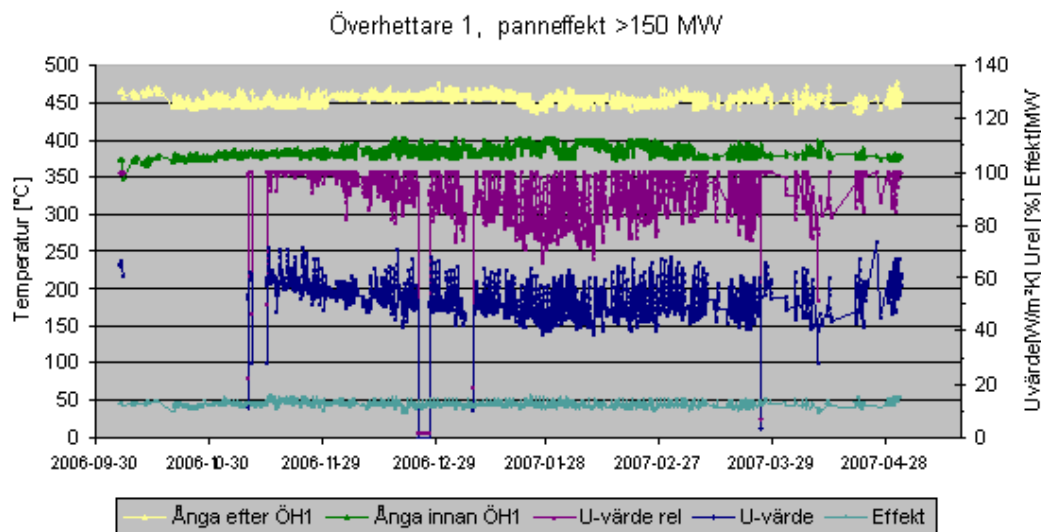
Trenderna för värmeöverföring och effekt är avtagande för ÖH2. Värmeöverföringen avtar med närmare 20 %, och effekten minskar från 8 MW till närmare 6,5 MW. I effektkurvan finns två inringade områden, tidsperioderna omfattar ett par dygn där sotning sker med täta sotningsintervall (ca 8 timmars sotningsintervall). Under dessa dygn är effekten och värmeöverföringen högre än dygnen före och efter.

4.4.2 Driftdata för överhettare 1



Driftdata för ÖH1 visas i Figur 4-9 nedan. I figuren visas trenderna för värmeöverföring och effekt i ÖH1, samt ångans temperaturer före och efter ÖH1 ses. Förändringen i värmeöverföring visas som relativt U-värde och U-värde. På primäraxeln visas temperaturer och sekundäraxeln visar värmeöverföring och effekt. Den översta kurvan i figuren visar ångans temperatur efter ÖH1 följt av ångans temperatur före ÖH1, efter insprutningen. Efter kurvorna för ångans temperatur visas kurvor för värmeöverföringen, trenden för relativt U-värde följt av trenden för U-värdet. Längst ner i figuren visas effektens förändring under perioden.

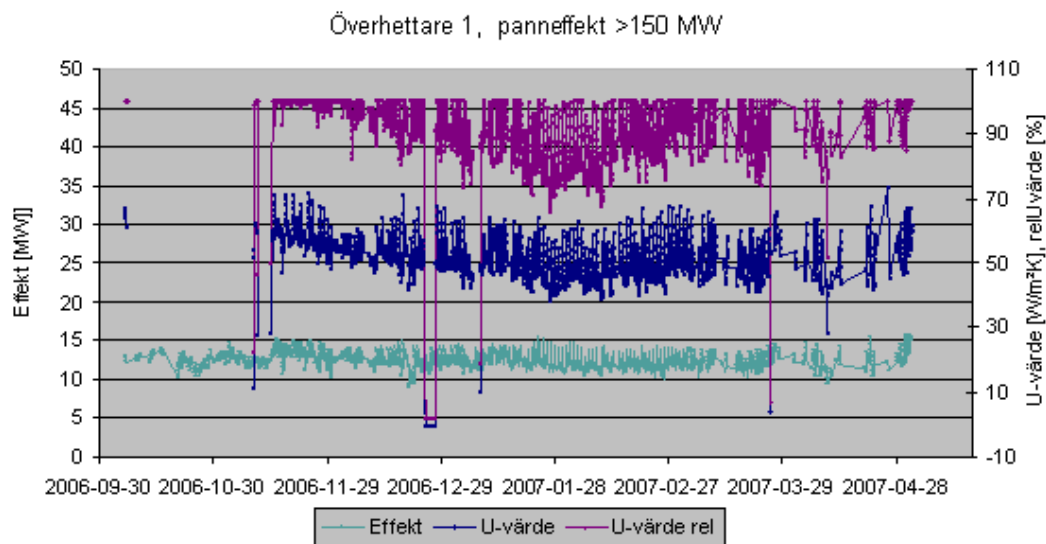
Förändring i driftdata under perioden från september 2006 till april 2007 visas i Här kan trenderna för värmeöverföring och effekt i ÖH1, samt ångans temperaturer före och efter ÖH1 ses. På primäraxeln visas temperaturer för ångan och på sekundäraxeln kan värmeöverföring och effekt ses. Överst i figuren visas kurvor för förändring i ångans temperatur efter ÖH1, kurvan direkt nedanför visar temperaturen på ångan in i ÖH1.



Figur 4-9: Driftdata för ÖH1, från september 2006 till april 2007

Ångans temperatur ökar från ca 375°C innan ÖH1 till ungefär 450°C efter ÖH1. Temperaturen på ångan ut från ÖH1 är relativt konstant under perioden, temperaturen på ångan före ÖH1 tycks öka något under perioden. Effekten varierar under perioden mellan 10 och 15 MW. Värmeöverföringen varierar mellan 100 % och 70 % respektive mellan 70 W/m²K och 40 W/m²K. Temperaturen på ångan innan ÖH1 är något högre mot slutet av perioden, men temperaturen efter ÖH1 är jämn under perioden.

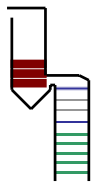
I Figur 4-10 visas förändring i värmeöverföring och effekt i ÖH1 närmare. De övre kurvorna visar relativt U-värde respektive U-värde längst ner visas effekten. Primäraxeln visar effekt i MW och sekundäraxeln visar värmeöverföring i % och W/m²K. Trenderna för både värmeöverföring och effekt är något avtagande under perioden.



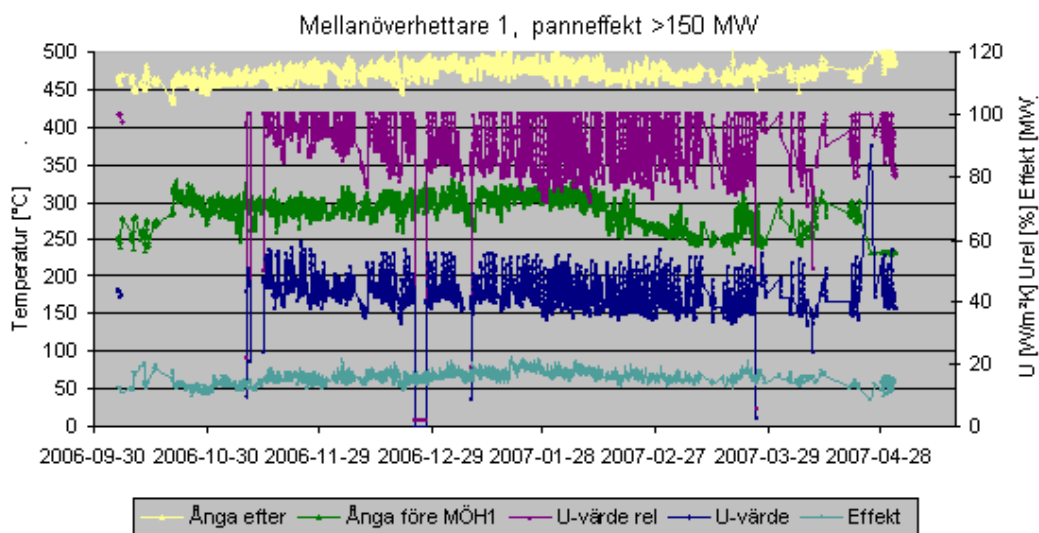
Figur 4-10: ÖH1, Värmeöverföring och effektförändring under perioden

Värmeöverföringen i ÖH1 avtar under perioden. Minskningen sker främst i början på perioden fram till januari, därefter planar kurvan ut.

4.4.3 Driftdata för mellanöverhettare 1



Driftdata för MÖH1 visas i Figur 4-11 nedan. I figuren visas trenderna för värmeöverföring och effekt i MÖH1, samt ångans temperaturer före och efter MÖH1 ses. Förändringen i värmeöverföring visas som relativt U-värde och U-värde. På primäraxeln visas temperaturer och sekundäraxeln visar värmeöverföring och effekt. Den översta kurvan i figuren visar ångans temperatur efter MÖH1 följt av relativ värmeöverföring, därefter visas ångans temperatur före MÖH1 efter insprutningen. U-värde visas innan kurvan effektens förändring längst ner i figuren.

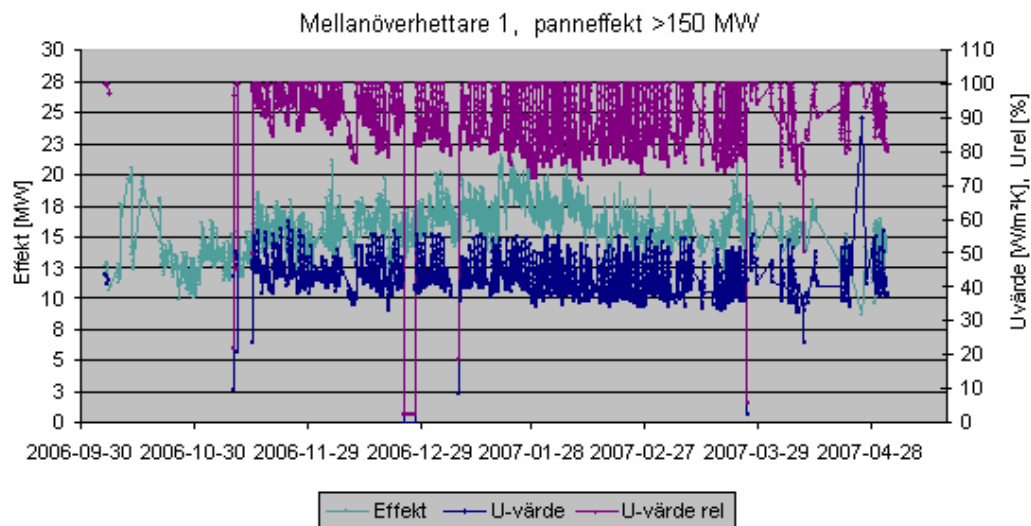


Figur 4-11: Driftdata för MÖH1, från september 2006 till april 2007

De förändringar som kan ses i MÖH1 under perioden är att ångans temperatur före och efter MÖH1 ökar något under perioden, mot periodens slut sker en förändring i driftförhållandena för MÖH1, vilket påverkar temperaturen på ångan före MÖH1. Ångans temperatur ungefär 450°C efter MÖH1, temperaturen före MÖH1 är kring 300°C i början av perioden men sänks till närmare 250°C mot slutet av perioden. Värmeöverföringen varierar mellan 100 % och 70 % respektive mellan 60 W/m²K och 35 W/m²K. Effekten varierar under perioden mellan 10 och 20 MW.

Trenderna för MÖH1 visar att värmeöverföringen och effekten under perioden är avtagande, ej lika tydligt som i ÖH2 eller ÖH1 men en minskning kan ses. Figur 4-12 nedan visar närmare hur effekt och värmeöverföring förändras under perioden. På primäraxeln visas värmeöverföring och på sekundäraxeln visas effekten. Kurvan överst i figuren visar relativt U-värde i %, följt av U-värde i W/m²K och längst ner effekten i MW.

Under perioden sjunker värdena på relativa U-värdet från att variera mellan 90 och 100 % till mellan 75 och 100 % mot slutet av perioden. Liknande minskning kan ses för U-värdet, i början av perioden håller sig värdet över 40 W/m²K för att mot slutet understiga 35 W/m²K. Effekten har varierat kraftigt under perioden. Den effekttökning som kan ses i periodens början beror troligen på den minskade värmeöverföringen i värmepaketet ovanför.



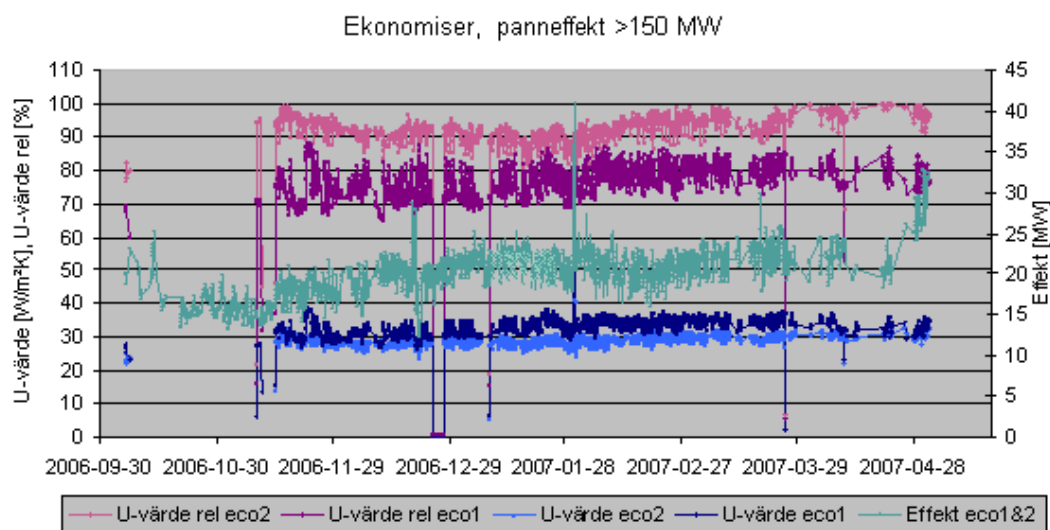
Figur 4-12: Förändring av U-värde, relativt U-värde och effekt i MÖH1

4.4.4 Driftdata för ekonomiser



Förändring i driftdata under perioden för ekonomisernas delar visas här. För att matarvattnet inte ska bli för varmt och börja koka kan ECO2 förbikopplas så att vattnet går direkt från ECO1 mot eldstaden. Detta medför att mindre matarvatten passerar genom ECO2 än ECO1 och värmeöverföringen per ytenhet blir lägre, samtidigt som värmeöverföringen minskar avkyls rökgaserna mindre vilket medför att rökgaserna som når ECO1 är varmare. Därmed kan värmeöverföringen tyckas minska efter en sotning men egentligen minskas flödet och därmed värmeupptagningen (Holmén, E., 2007).

I Figur 4-13 visas hur värmeöverföring och effekt för ECO1 och ECO2 har förändrats under perioden. På primäraxeln visas värmeöverföring och på sekundäraxeln visas effekten.

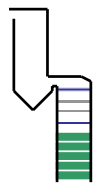


Figur 4-13: Driftdata för ECO1 och ECO2, från september 2006 till april 2007.

Effekt kurvan visar effekten för hela ekonomisern, både ECO1 och ECO2. De två översta kurvorna i figuren visar värmeöverföring, relativt U-värde för ECO2 överst och ECO1

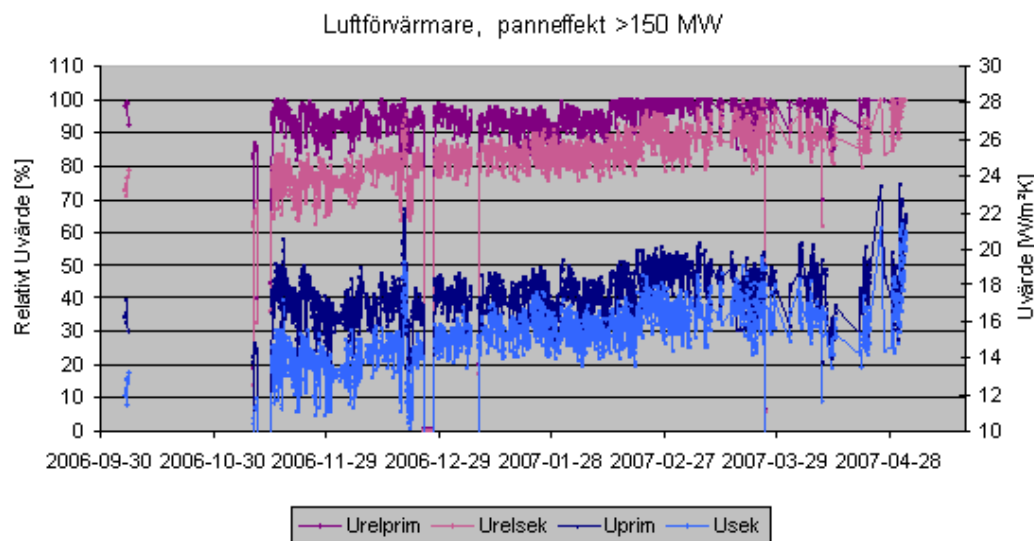
nedanför. Kurvan i mitten av figuren visar förändringen i effekt för hela ekonomisern. De två nedersta kurvorna i figuren visar förändringen i U-värde för ECO1 övre kurvan och ECO2 den nedre kurvan. Värmeöverföringen i ECO2 varierar under perioden mellan 100 % och 80 % i periodens mitt, mot slutet av perioden är variationen mellan 100 % och 90 %. Värmeöverföringen i ECO2 är större i slutet av perioden. I ECO1 ser trenden liknande ut. Värmeöverföringen varierar mellan 80 % och 70 % i periodens början och mitt, mot slutet av perioden är intervallet mellan 85 % och 75 %. Effekten för ECO visar en ökning under perioden, från 15 MW till ett intervall mellan 20 MW och 25 MW.

4.4.5 Driftdata för luftförvärmare



Förändring i driftdata för luftförvärmaren under perioden visas i Figur 4-14 nedan. Den översta kurvan visar relativt U-värde för primärluftförvärmaren därefter visas relativt U-värde för sekundärluftförvärmaren, U-värde för primärluftförvärmare och U-värde för sekundärluftförvärmare. På primäraxeln visas värden för relativt U-värde i %. På sekundäraxeln visas värden för U-värden i $\text{W/m}^2\text{K}$.

Värmeöverföringen för LUFÖ är ökande under perioden. Detta visas i Figur 4-14 nedan. I periodens början varierar värmeöverföringen mellan 100 % och 85 % för LUFÖprim och mellan 80 % och 65 % för LUFÖsek. Mot slutet av perioden har detta ökat till att variera mellan 100 % och 95 % för LUFÖprim samt mellan 95 % och 80 % för LUFÖsek.



Figur 4-14: Driftdata för LUFÖ prim & sek, från september 2006 till april 2007

4.4.6 Diskussion kring driftdata för perioden

Värmeöverföringen i ÖH2 visar en avtagande trend under perioden, mot slutet av perioden har värmeöverföringen minskat med 20 % i ÖH2. Rökgasernas temperatur innan ÖH2 är jämn under perioden, minskningen i värmeöverföring beror på beläggningstillväxten som tilltagit under perioden. När värmeöverföringen i ÖH2 försämrats och ångan i ÖH2 kan ta upp mindre värme från rökgaserna blir rökgastemperaturen efter ÖH2 högre. Detta visas genom att en ökande trend för rökgastemperaturen efter MÖH1 under perioden kan ses i Figur 4-4.

Högre temperaturer påverkar värmeöverföringen positivt. Vid jämförelse mellan rökgasernas temperatur och effektupptagningen i överhettarna, syns det att vid minskat effektupptaget i överhettarna ökar rökgastemperaturerna efter. Varmare rökgastemperaturer längre ned i rökgasstråket orsakas av minskad värmeöverföring i högre delar.

Trenderna för värmeöverföringen i ÖH1 är även de avtagande under perioden, minskningen är ej riktigt lika stor som i ÖH2 men nästan. Skillnaden mellan värmeöverföringsminskningen i ÖH1 och ÖH2 beror på att då värmeöverföringen minskar i ÖH2 ökar rökgastemperaturerna för ÖH1, vilket ger en något högre värmeöverföring där, även om beläggningstillväxten är lika stor i båda delarna. En ökning av temperaturen på ångan innan överhettaren samtidigt som ångans temperatur efter överhettaren är konstant visar även på en avtagande värmeöverföring. Det krävs högre temperatur in i överhettaren för att nå samma temperatur efter. I och med att ångans temperatur efter ÖH1 varit mer eller mindre konstant under perioden har minskad värmeöverföring i ÖH1 inte påverkat temperaturen på ångan in i ÖH2.

Värmeöverföringen i MÖH1 är något avtagande under perioden, minskningen sker främst i periodens början, från september till januari, därefter är värmeöverföringen relativt jämn. Effekten i MÖH1 varierar kraftigt under perioden.

Den avtagande trenden för värmeöverföringen som kan ses i början av perioden för överhettarna beror bland annat på att sotningstillfällena i överhettarna under början av perioden var få. Vilket leder till en stadigt försämrade värmeöverföring.

Trenden för värmeöverföring och effekt i ECO är ökande under perioden, tillskillnad från överhettarnas avtagande trender. Ökningen beror troligen på att rökgasernas temperatur ökar bakåt i rökgasstråket då beläggningstillväxten tilltar på överhettarna. Därmed kan mer värme upptas i ekonomisern och effekten ökar. Kurvorna för ECO1 och ECO2 ser olika ut, detta beror på förbikopplingen av ECO2. Placeringen av delarna kan även påverka då ECO2 är placerad överst och möts först av rökgaserna så kan värmeöverföringen vara högre samtidigt som beläggningstillväxten kan vara mer omfattande än i ECO1 som skyddas till viss del av tubrören ovanför.

I LUFÖ är trenden för värmeöverföringen ökande under perioden. Detta beror dels på att beläggningstillväxt på delar längre upp i rökgasstråket lett till ökande temperaturer på rökgaserna i LUFÖ. Dels har som visats ovan sotningsintervallen i LUFÖ varit tätare än i övriga delar. Rökgasernas temperatur innan slangfiltret får ej bli för hög, temperaturer över 180°C kan orsaka skador i slangfiltren. Därför sker tätare sotningsintervall i LUFÖ och ECO för att värmeupptagningen i dessa delar ska vara tillräcklig för att hålla lagom temperatur innan slangfiltret.

4.5 Sotningstest

Ett test att sota pannan då värmeöverföringen minskat till en viss nivå utfördes i april. Syftet med sotningstestet var att se hur täta intervall som skulle krävas för att värmeöverföringen inte skulle bli för låg.

Först studerades vilka intervall som värmeöverföringen varierade mellan. Det visades att för ÖH2 varierade det mellan 55 och 25 W/m²C. Medan U-värdet på ECO2 varierade mellan 32 och vanligen 25 W/m²C. Testet innebar att sotning skulle ske i överhettarstråket (sotblåsare 1-

14) då U-värdet i ÖH2 minskar med 15 enheter, till 40 W/m²C. Sotning i resterande delar (sotblåsare 15-32) skulle ske då U-värdet i ECO2 minskat med 5 enheter, 29 W/m²C.

4.5.1 Resultat och diskussion kring sotningstestet

Värmeöverföringen varierar, vilket gör det svårt att påbörja sotningen då värmeöverföringen nått en viss nivå. Detta kan inträffa väldigt snart efter sotningen eller dröja en längre tid, minskningen kan ske snabbt eller mer långsamt. Då den neråtgående trenden påbörjats kan den första minskningen ske snabbt.

Då sotningstestet utfördes varierade pannans drift, vilket bidrog till att det var svårt att se några tydlig resultat från testet. Men som ett resultat kan sägas att variationen i driftförhållanden påverkar temperaturer, värmeöverföring och effekter i överhettarna, vilket gör det svårt att se vilken effekt sotningen har.

- Testa att genomföra sotningstestet på nytt under mer jämna förhållanden, tex samma last och bränsle mm.

4.6 Betydelsen av sotning och sotningsintervall

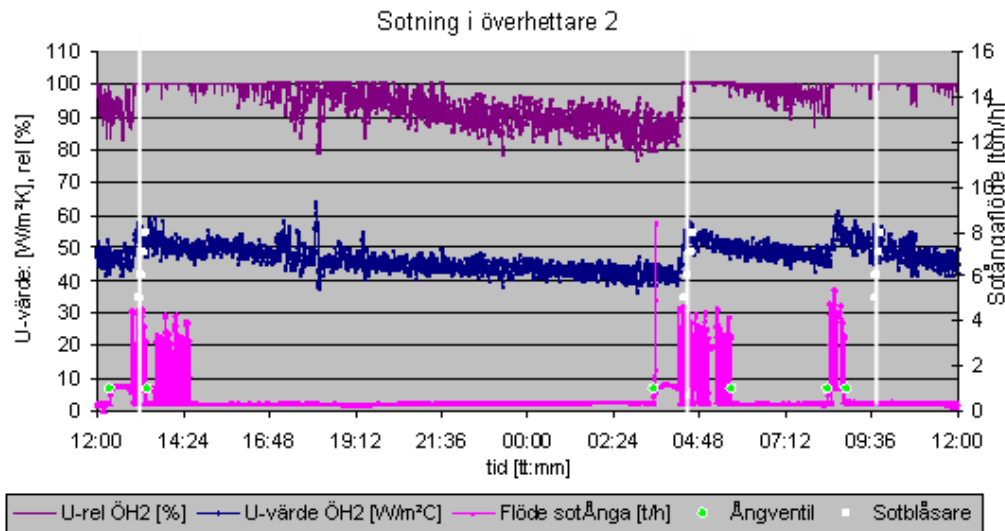
Sotningens rengörande effekt visas genom den förändring av värmeöverföring och effekt som sker i samband med sotningstillfället. Driftdata före och efter sotningstillfällen analyseras och jämförs med tiden mellan sotningarna. Sotningsintervall på med 24 timmar respektive 8 timmars mellanrum jämförs med avseende på intervallets betydelse för värmeöverföring och effekt, kostnad för förbrukning av sotningsånga samt vad en förändrad sotningsfrekvens betyder för värmeöverföringen under perioden.

4.6.1 Överhettare 2

4.6.1.1 Sotningens påverkan

Vid sotningstillfället avlägsnas beläggningar vilket medför att värmeöverföringen stiger, då sotningen avslutats påbörjas beläggningstillväxten och värmeöverföringen avtar på nytt. Hur värmeöverföringen i ÖH2 påverkas vid sotningen samt vid olika täta sotningsintervall visas i Figur 4-15.

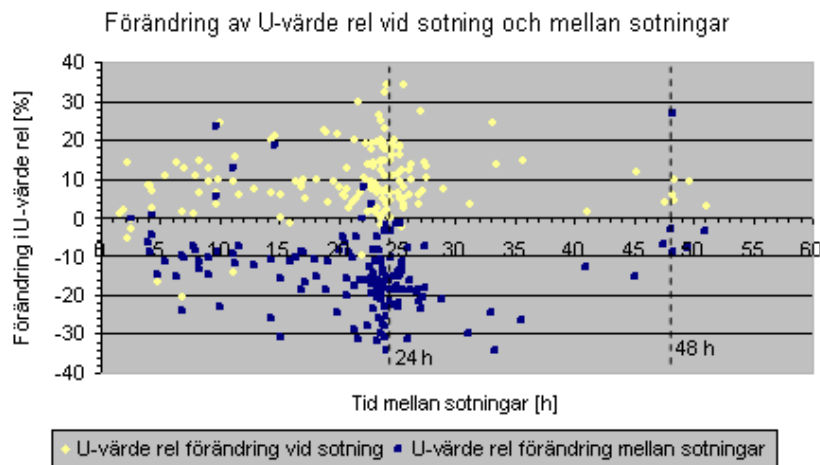
Driftdata har samlats in under en period på ett par dygn då sotning utfördes med olika sotningsintervall. För att få hög noggrannhet är mätvärdena insamlade var 10:e sekund. På primäraxeln visas värmeöverföring, på sekundäraxeln ses sotningsångans flöde.



Figur 4-15: Förändring av U-värde i ÖH2 under ett dygn, värden med 10 sekunders mellanrum

Direkt efter sotningen avslutats påbörjar beläggningstillväxten och värmeöverföringen avtar. Under det längre sotningsintervallet sker en minskning i värmeöverföring med ungefär 20 %. Minskningen under det tätare sotningsintervallet är närmare 10 %.

I Figur 4-16 visas förändringen i värmeöverföring före och efter sotningstillfället och förändringen i värmeöverföring under tiden mellan sotningarna som en funktion av tiden mellan sotningarna. De ljusa punkterna visar förändringen i värmeöverföring vid sotningstillfället och de mörka punkterna visar förändringen mellan sotningstillfällena.

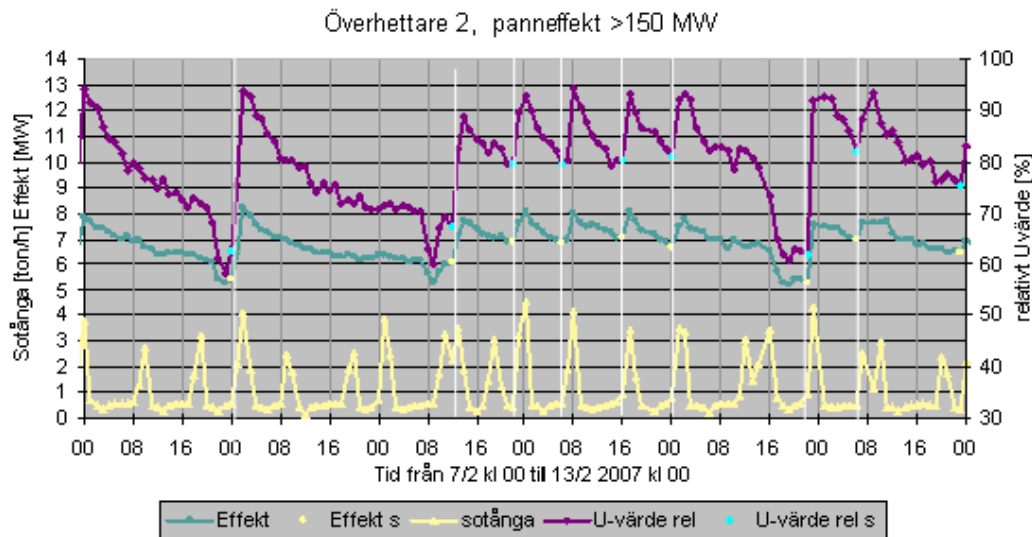


Figur 4-16: U-värdets förändring vid sotning och mellan sotningar i ÖH2

Effekten från sotningen är mindre vid täta intervall, medan längre intervall ger både större rengöringseffekt och större minskning mellan sotningarna. Trenden för ÖH2 pekar på att sotningsintervall på 24 timmar medför större minskning mellan sotningarna därmed får sotningen även större rengöringseffekt än sotningsintervall på 8 timmar.

4.6.1.2 Vinst för olika sotningsintervall

En jämförelse mellan förändring i värmeöverföring och effekt vid sotningsintervall med 24 timmar respektive 8 timmars mellanrum visas i Figur 4-17.



Figur 4-17: Värmeöverföring och effektförändring i ÖH2 från 7/2 till 13/2 2007

Primäraxeln visar effekt och flöde på sotningsånga och sekundäraxeln visar värmeöverföring. Tidpunkter då sotning sker i ÖH2 visas med vita linjer i figuren. Den övre kurvan visar värmeöverföring, kurvan i mitten visar effekt och längst ner visas sotningsångans flöde.

Vid 24 timmars intervall minskar värmeöverföringen från 95 % direkt efter utförd sotning till 60 % innan nästa sotningstillfälle. Vid 8 timmars intervall är minskningen från 95 % efter utförd sotning till 80 %. Vid tätare sotningsintervall blir värmeöverföringens minskning mindre än vid längre sotningsintervall. Minskningen mellan sotningarna blir på 10-15% vid 8 timmars intervall istället för 25-30% vid 24 timmars sotningsintervall.

Effektens minskning vid 24 timmars sotningsintervall är från 8 MW till 6 MW. Vid sotningsintervall på 8 timmar är minskningen från 8 MW till 7 MW. Effekten minskar från 0,5 MW till 1 MW mindre under de dygn sotningsintervall på 8 timmar används jämfört med sotningsintervall på 24 timmar. Genom att minska sotningsintervallen kan 8-16 MWh mer kan tas ut per dygn. Under periodens 219 dagar ger detta mellan 1700 och 3500 MWh.

- Den totala vinsten vid att använda tätare sotningsintervall blir för ÖH2 mellan 500 och 900 kkr.
- Kostnaden för sotningsånga förbrukning vid 8 timmars sotningsintervall är 130 kkr.

4.6.1.3 Diskussion, överhettare 2

Värmeöverföringen under perioden är avtagande, trenden visar på en minskning med 20 % från periodens början. Att trenden för värmeöverföring i ÖH2 under perioden är avtagande tyder på att sotningen ej rengör ytorna helt och/eller att intervallen mellan sotningarna är för långa så att beläggningarna som bildas är för hårda för att helt avlägsnas vid sotningen. Vid sotningstillfället avbryts minskningen i värmeöverföring då beläggningar avlägsnas från ytorna. I Figur 4-15 visas att minskningen i värmeöverföring påbörjas direkt efter sotningen avslutats.

Rengöringseffekten från sotningen är mindre vid tätare sotningsintervall, men avtagandet i värmeöverföring och effekt mellan sotningarna är även mindre. Genom att använda tätare sotningsintervall kan den effekt- och värmeöverföringsminskning som sker i ÖH2 avbrytas. Sotningsintervallet har betydelse dels genom att minskningen mellan intervallen avtar vid

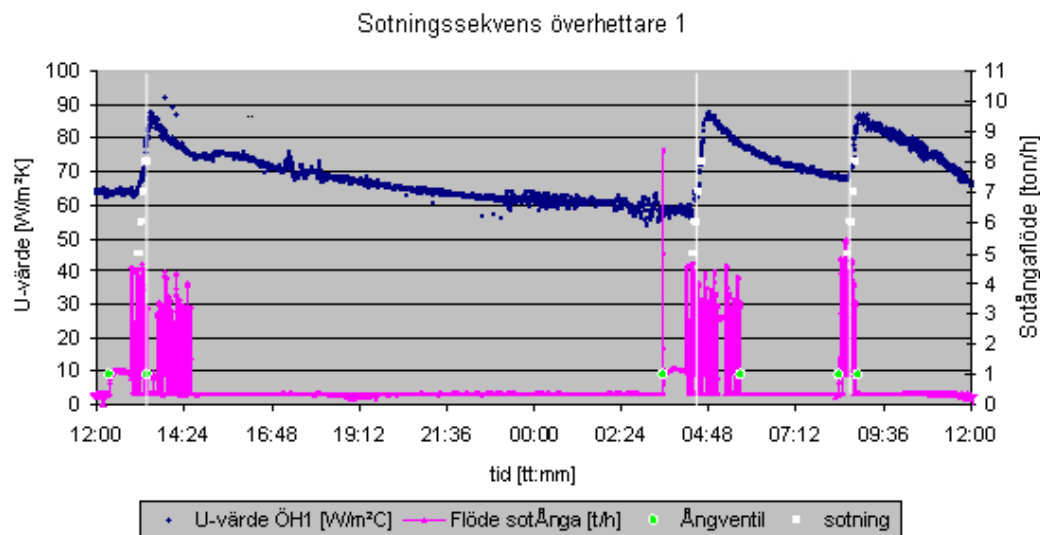
sotningen och dels genom att minskningen avbryts kan nivån för värmeöverföring och effekt hållas på en högre nivå under en längre tidsperiod.

Vid sotningsintervall på 8 timmar har minskningen under tiden mellan sotningarna nästan halverats jämfört med vid sotningsintervall på 24 timmar. Även vid sotningsintervall på 8 timmar kan en viss avtagande trend väntas, bör tätare sotningsintervall resultera i att de avtagande trenderna för värmeöverföring och effekt blir mindre för ÖH2. Utifrån dessa beräkningar, och uppskattningar är det lönsamt att använda sotningsintervall på 8 timmar istället för 24 timmar som främst använts under perioden. Införandet bör dock ske med försiktighet då ökat antal sotningar är mer påfrestande för materialet inne i pannan.

4.6.2 Överhettare 1

4.6.2.1 Sotningens påverkan

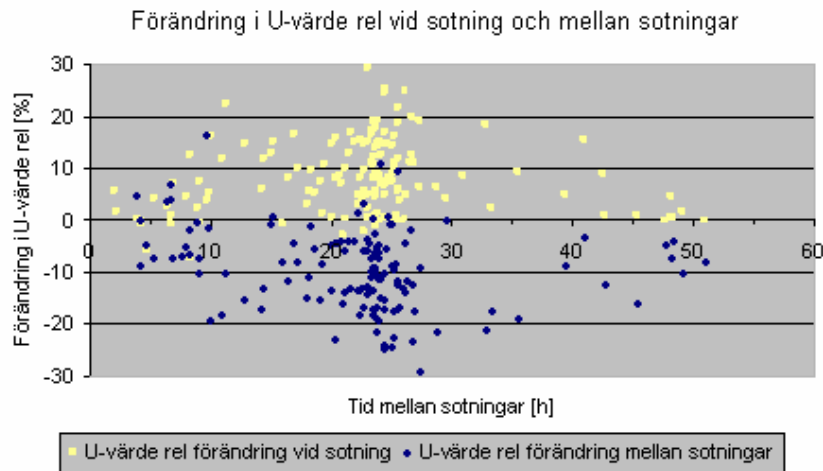
I Figur 4-18 visas sotningens påverkan på värmeöverföringen för ÖH1 vid olika täta sotningsintervall. För att få hög noggrannhet är mätvärdena insamlade var 10:e sekund. På primäraxeln visas värmeöverföring, på sekundäraxeln ses sotningsångans flöde. Kurvan i mitten av figuren visar värmeöverföringens förändring och längst ner visas förändringen av sotningsångans flöde.



Figur 4-18: Förändring av U-värde i ÖH1 under ett dygn, värden insamlade var 10:e sekund

Vid det tätare sotningsintervallet hålls värmeöverföringen på en högre nivå än vid det längre sotningsintervallet innan. Minskning i värmeöverföring under det korta intervallet är ungefär en tredjedel av minskningen vid det längre sotningsintervallet. I figuren syns även tydligt att belägningspåbyggnaden påbörjas direkt efter sotningstillfället, då värmeöverföringen avtar direkt efter avslutad sotning. Ungefär 3 timmar efter sotningstillfället har värmeöverföringen i ÖH1 minskat med nära 20 %.

I Figur 4-19 visas förändringen i värmeöverföring före och efter sotningstillfället och förändringen i värmeöverföring under tiden mellan sotningarna som en funktion av tiden mellan sotningarna. De ljusa punkterna visar förändringen i värmeöverföring vid sotningstillfället och de mörka punkterna visar förändringen mellan sotningstillfällena.

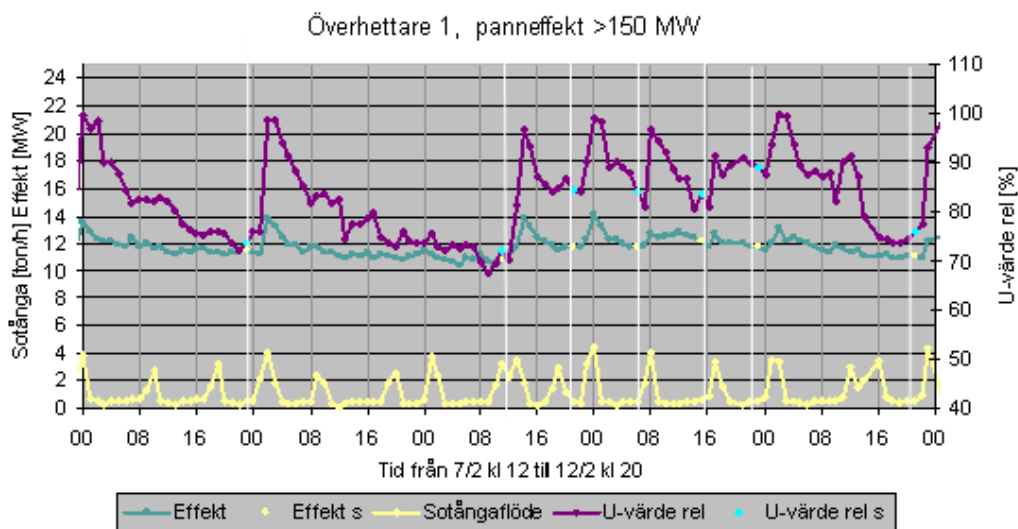


Figur 4-19: U-värdets förändring vid sotning och mellan sotningar i ÖH1

Effekten från sotningen är mindre vid täta intervall, medan längre intervall ger både större rengöringseffekt och större minskning mellan sotningarna. Trenden för ÖH1 pekar på att sotningsintervall på 24 timmar medför större minskning mellan sotningarna därmed får sotningen även större rengöringseffekt än sotningsintervall på 8 timmar.

4.6.2.2 Vinst för olika sotningsintervall

En jämförelse mellan förändring i värmeöverföring och effekt vid sotningsintervall med 24 timmar respektive 8 timmars mellanrum visas i Figur 4-20. Primäraxeln visar effekt och flöde på sotningsånga och sekundäraxeln visar värmeöverföring. Tidpunkter då sotning sker i ÖH2 visas med vita linjer i figuren. Den övre kurvan visar värmeöverföring, kurvan i mitten visar effekt och längst ner visas sotningsångans flöde.



Figur 4-20: Värmeöverföring och effektförändring i ÖH1 från 7/2 till 12/2 2007

Vid 24 timmars intervall minskar värmeöverföringen från 100 % direkt efter utförd sotning till drygt 70 % innan nästa sotningstillfälle. Vid 8 timmars intervall är minskningen från 100 % efter utförd sotning till 80 %. Vid tätare sotningsintervall blir värmeöverföringens minskning 5% mindre än vid längre sotningsintervall.

Effektens minskning vid 24 timmars sotningsintervall är från 14 MW till 11 MW. Vid sotningsintervall på 8 timmar är minskningen från 14 MW till 12 MW. Effekten minskar från 1 MW till 2 MW mindre under de dygn sotningsintervall på 8 timmar används jämfört med sotningsintervall på 24 timmar. Genom att minska sotningsintervallen kan 16-32 MWh mer kan tas ut per dygn. Under periodens 219 dagar ger detta mellan 3500 och 7000 MWh.

- Den totala vinsten vid att använda tätare sotningsintervall blir för ÖH1 mellan 900 och 2000 kkr.
- Kostnaden för sotningsånga förbrukning vid 8 timmars sotningsintervall är 140 kkr.

4.6.2.3 Diskussion, överhettare 1

Vid sotningstillfället avbryts minskningen i värmeöverföring och effekt. Under perioden har främst sotningsintervall på 24 timmar använts. Genom att använda tätare sotningsintervall kan den effekt- och värmeöverföringsminskning som sker i ÖH1 avbrytas

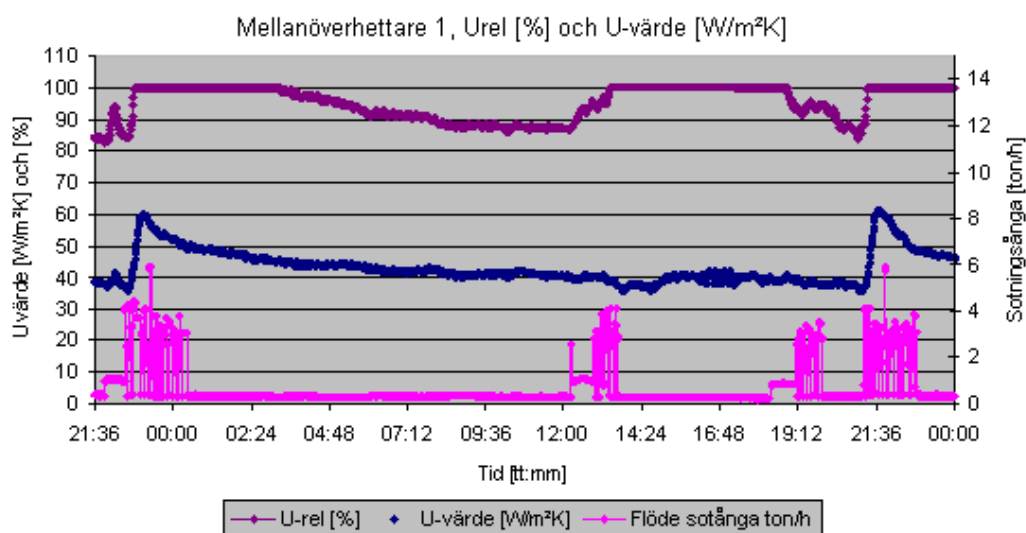
Vid täta sotningsintervall kan effekt och värmeöverföring hållas på en högre nivå i och med att de avtagande trenderna som fås vid längre sotningsintervall avbryts. Detta bör resultera i att de avtagande trenderna för värmeöverföring och effekt blir mindre för ÖH1. Utifrån dessa beräkningar, och uppskattningar är det lönsamt att använda sotningsintervall på 8 timmar istället för 24 timmar som främst använts under perioden. Införandet bör dock ske med försiktighet då ökat antal sotningar är mer påfrestande för materialet inne i pannan.

4.6.3 Mellanöverhettare 1

Värmeöverföringens förändring i samband med sotningstillfället och under tiden mellan sotningstillfällena visas för MÖH1.

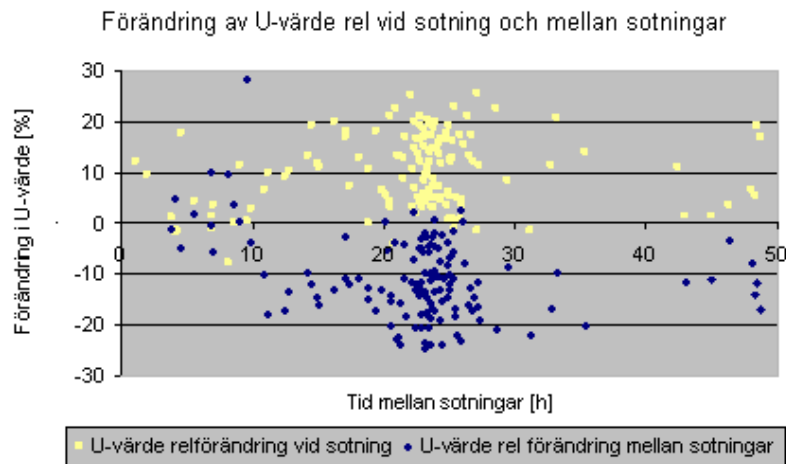
4.6.3.1 Sotningens påverkan

Vid sotningstillfället avlägsnas beläggningar vilket medför att värmeöverföringen stiger, då sotningen avslutats påbörjas beläggningstillväxten och värmeöverföringen avtar på nytt. Hur värmeöverföringen i MÖH1 påverkas vid sotningen visas i Figur 4-23. Driftdata har samlats in insamlade med en minuts mellanrum under ett par dygn. På primäraxeln visas värmeöverföring, på sekundäraxeln ses sotningsångans flöde.



Figur 4-21: Förändring av U-värde i MÖH1 under ett dygn, värden med en minuts mellanrum

Direkt efter sotningen avslutats påbörjar beläggningstillväxten och värmeöverföringen avtar. Minskningen är med ungefär 10 % mellan sotningarna. I Figur 4-22 visas förändringen i värmeöverföring före och efter sotningstillfället och förändringen i värmeöverföring under tiden mellan sotningarna som en funktion av tiden mellan sotningarna. De ljusa punkterna visar förändringen i värmeöverföring vid sotningstillfället och de mörka punkterna visar förändringen mellan sotningstillfällena.

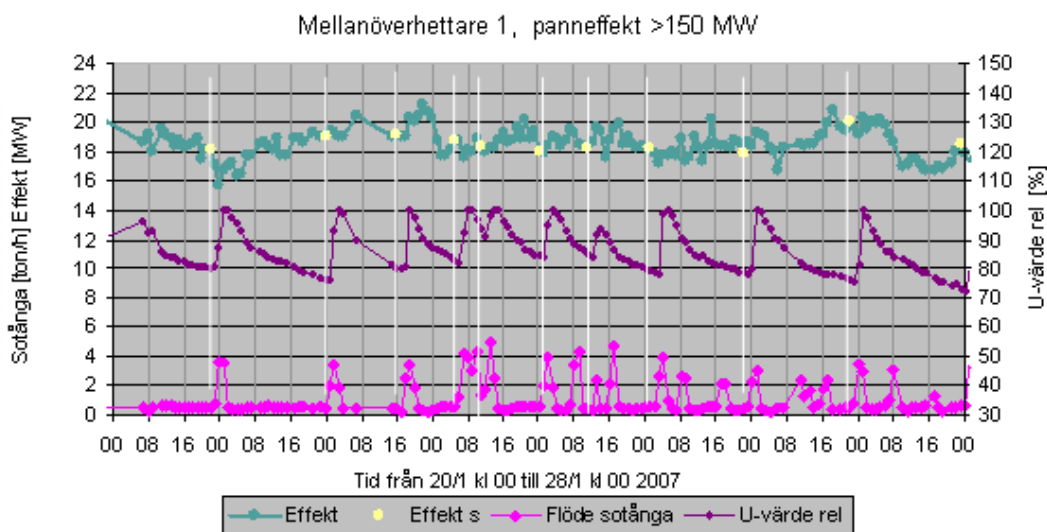


Figur 4-22: Förändring av U-värde vid sotningar och mellan sotningar i MÖH1

I MÖH1 har de flesta sotningar skett vid 24h intervall, antalet sotningsintervall med tätare mellanrum är för få för att jämförelse ska kunna göras.

4.6.3.2 Vinst för olika sotningsintervall

Sotningsintervallens påverkan på värmeöverföring och effekt i MÖH1 visas i Figur 4-23. De vita linjerna visar när sotning sker i MÖH1 under perioden. Perioden som visas är från 20:e till 28:e januari 2007, då sotas MÖH1 med 24 och 8 timmars intervall. Den översta kurvan visar hur effekten förändras i MÖH1 under perioden, därefter kan förändring i värmeöverföring ses och längst ner i figuren visas flödet för sotningsångan under den studerade perioden.



Figur 4-23: Värmeöverföring och effektförändring i MÖH1 från 21/1 till 28/1 2007

Vid 24 timmars intervall minskar värmeöverföringen från 95 % direkt efter utförd sotning till 70-80 % innan nästa sotningstillfälle. Vid 8 timmars intervall är minskningen från 95 % efter utförd sotning till 85 %. Vid tätare sotningsintervall blir värmeöverföringens minskning mindre än vid längre sotningsintervall. Minskningen mellan sotningarna blir på 10-15% vid 8 timmars intervall istället för 25-30% vid 24 timmars sotningsintervall. För MÖH1 har en minskning i värmeöverföringens avtagande kunnat ses då längre sotningsintervall används. Minskningen i värmeöverföring är mellan 5 och 15 % lägre vid 8 timmars intervall än vid 24 timmars intervall.

Sotningsintervalllets påverkan på effekten i MÖH1 har varit svår att se, därmed har beräkningar för vinst ej gjorts.

4.6.3.3 Diskussion, mellanöverhettare 1

I MÖH1 är värmeöverföringen något avtagande under perioden, främst sker minskningen i periodens början. Effekten i MÖH1 varierar kraftigt under perioden, vilket kan bero på att värmeupptagningen ökar då beläggningarna tillväxer i ÖH1 och ÖH2 ovanför. Rökgasernas temperatur blir då högre för MÖH1, och större effekt upptag blir möjligt.

De flesta sotningsintervallen i MÖH1 är på 24 timmar, Figur 4-22 visar att antalet sotningar kring 8 timmars intervall är få. Det verkar finnas en antydning till att intervall tätare än 10 timmar ger mindre förluster mellan sotningarna men inte så stor förändring vid själva sotningen. Men antalet mätvärden är för få för att veta om detta är en slump eller en trend.

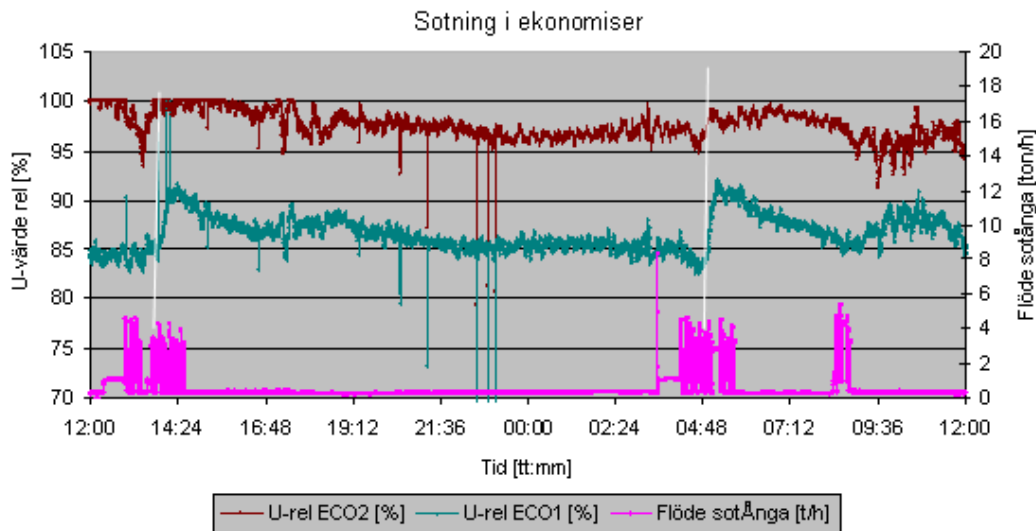
Beräkningar för en möjlig vinst från att öka tätheten på sotningsintervallen är svår att göra i MÖH1 då effekten varierar kraftigt under perioden. Värmeöverföringens påverkan från sotningen visar att tätare sotningsintervall i MÖH1 kan ge större värmeöverföring under perioden genom att minskningen mellan sotningstillfällena kan avbrytas. Ökad täthet på sotningsintervallen kan vara lönsamt i MÖH1.

4.6.4 Ekonomiser

4.6.4.1 Sotningens påverkan

Vid sotningstillfället avlägsnas beläggningar vilket medför att värmeöverföringen stiger, då sotningen avslutats påbörjas beläggningstillväxten och värmeöverföringen avtar på nytt. Hur värmeöverföringen i ECO påverkas vid sotningen samt vid olika täta sotningsintervall visas i Figur 4-24

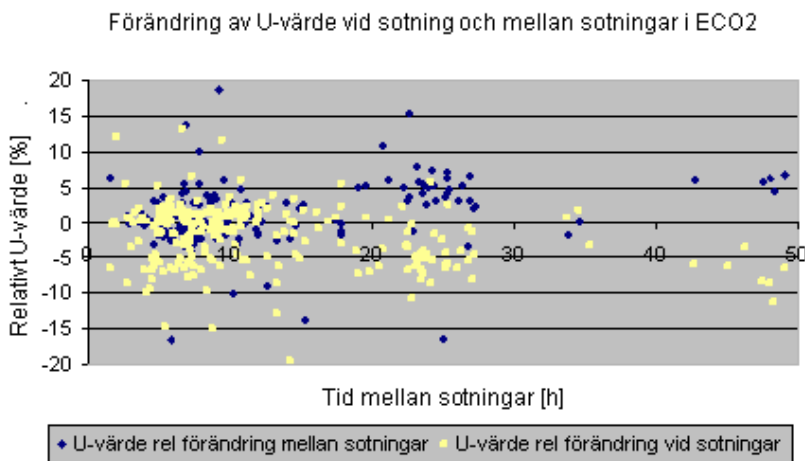
Driftdata har samlats in under en period på ett par dygn då sotning utfördes med olika sotningsintervall. För att få hög noggrannhet är mätvärdena insamlade var 10:e sekund. På primäraxeln visas värmeöverföring, på sekundäraxeln ses sotningsångans flöde.



Figur 4-24: Relativt U-värde i ECO 1 & 2 under ett dygn, värden med 10 sekunders mellanrum

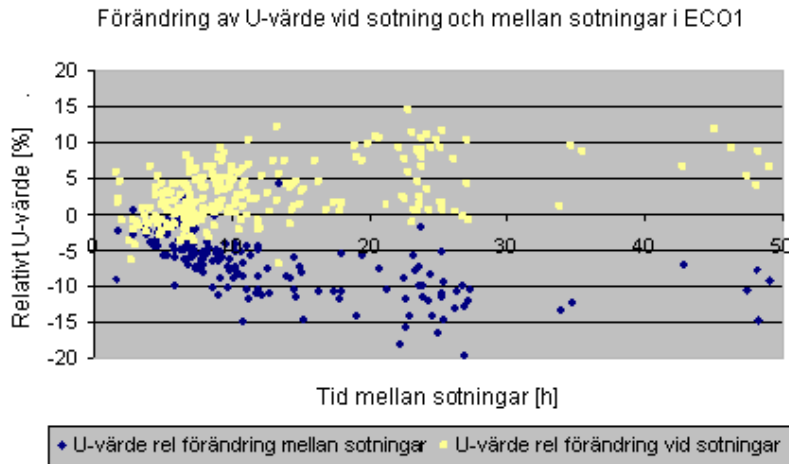
Under tiden mellan sotningarna minskar värmeöverföringen i ECO1 och i ECO2 med 5 %, den största minskningen sker under de första sju timmarna, därefter tycks det plana ut men är på väg ner igen precis innan sotningen sker.

Nedan visas förändringen i värmeöverföring före och efter sotningstillfället och förändringen i värmeöverföring under tiden mellan sotningarna som en funktion av tiden mellan sotningarna. De ljusa punkterna visar förändringen i värmeöverföring vid sotningstillfället och de mörka punkterna visar förändringen mellan sotningstillfällena. I ekonomiserns båda delar är det vanligaste sotningsintervallet 8 timmar. Värden för ECO2 visas i Figur 4-25 och värden för ECO1 visas i Figur 4-26.



Figur 4-25: Förändring av U-värde vid sotningar och mellan sotningar i ECO2

I ECO2 är förändringen i värmeöverföring vid sotningstillfället avtagande. Under tiden mellan sotningstillfällena i ECO2 ökar värmeöverföringen och minskar då sotningen utförs.

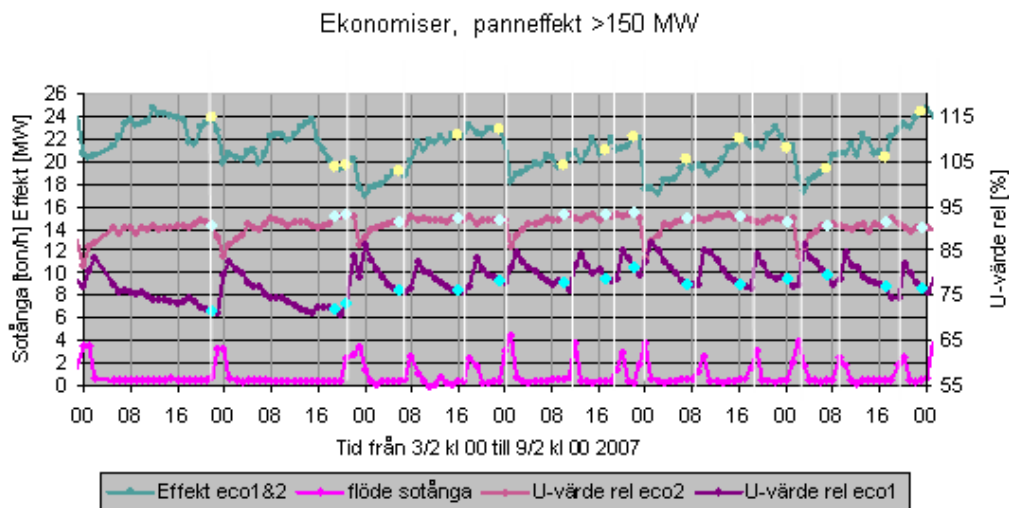


Figur 4-26: Förändring av U-värde vid sotning och mellan sotningar i ECO1

I ECO1 ser förändringen annorlunda ut, jämfört med ECO2. Vid sotningstillfällena sker här en ökning i värmeöverföring och under tiden mellan sotningarna avtar värmeöverföringen.

4.6.4.2 Vinst för olika sotningsintervall

Förändring av effekt och värmeöverföring i ECO1 och ECO2 vid olika sotningsintervall visas i Figur 4-27. De vita linjerna visar när sotnings sker i ECO under perioden. Perioden som visas är från 3:e till 9:e februari 2007. ECO sotas då med både 24 och 8 timmars intervall. Den översta kurvan visar hur effekten förändras i ECO under perioden, effekten mäts för ECO1 och ECO tillsammans. Därefter kan förändring i värmeöverföring ses för ECO2 följt av förändring i värmeöverföring i ECO1. Längst ner i figuren visas flödet för sotningsångan under den studerade perioden.



Figur 4-27: Värmeöverföring och effektförändring i ECO från 3/2 till 9/2 2007

Vid 24 timmars sotningsintervall i ECO1 minskar värmeöverföringen från 85 % direkt efter utförd sotning till 70 % innan nästa sotningstillfälle. Vid 8 timmars intervall är minskningen från 85 % efter utförd sotning till 75-80 %. Vid tätare sotningsintervall blir minskningen av värmeöverföringen 5-10 % mindre än vid längre sotningsintervall.

Vid 24 timmars sotningsintervall i ECO2 minskar värmeöverföringen vid sotningen, under tiden mellan sotningarna ökar värmeöverföringen. Förändringen vid olika täta sotnings-

intervall har mindre påverkan för värmeöverföringen i ECO2. Värmeöverföringen varierar mellan 90 % och 85 %. För effekten är trenderna svåra att tyda, några direkta samband mellan effektförändring och täthet på sotningsintervall har ej kunnat ses. Därmed har beräkning för vinst i ECO ej kunnat göras.

4.6.4.3 Diskussion, ekonomiser

Värmeöverföring i ECO1 och ECO2 ser tämligen olika ut, detta beror på den förbikoppling av ECO2 som beskrivs ovan. I ECO är de vanligaste sotningsintervallen kring 8h tillskillnad från överhettarna där de vanligaste sotningsintervallen är kring 24 timmar.

För ECO1 kan ses att vid sotningsintervall kring 8 timmar är minskningen i värmeöverföring 5-10 % lägre än vid sotningsintervall kring 24 timmar. I ECO1 kan ses att förändringen vid 8 timmars intervall ger mindre förändring i värmeöverföring vid sotningstillfället men även mindre minskning under tiden mellan sotningarna.

För ECO2 tycks värmeöverföringen öka något mellan sotningarna vilket medför en minskning av värmeöverföringen vid sotningstillfället på ungefär 5 %. Detta tycks inte påverkas av sotningsintervallens längd, även om täta sotningsintervall även leder till en ökning vid sotningstillfället. Den förbikoppling av ECO2 som beskrevs ovan i 4.4.4, medför att då sotning sker i ECO så ökar värmeöverföringen i ECO1 vilket leder till varmare temperaturer på vattnet efter ECO1, vilket i sin tur medför att ECO2 förbikopplas. Flödet på vattnet genom ECO2 blir mindre och värmeöverföringen per ytenhet blir lägre. I takt med att värmeöverföringen avtar i ECO1 ökar flödet och därmed värmeupptagningen i ECO2.

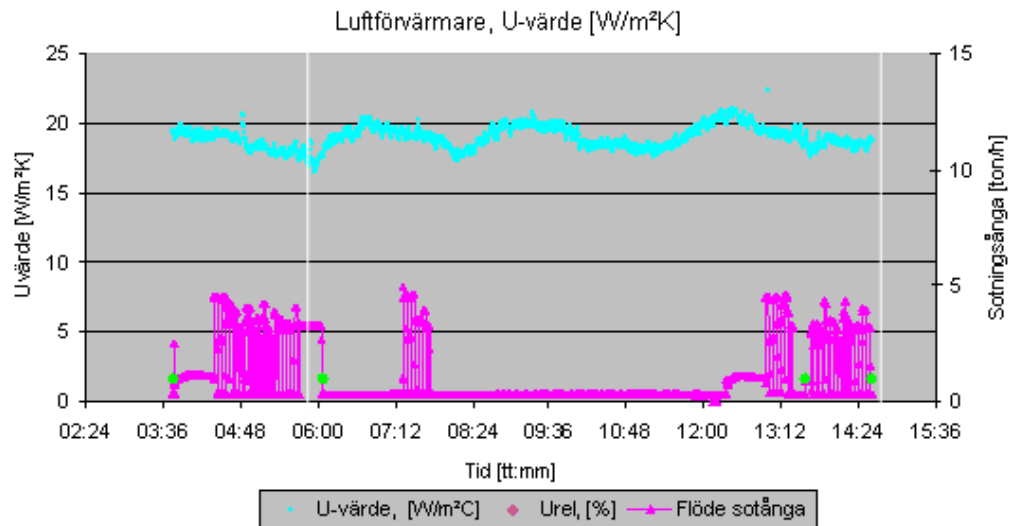
För effekten är trenderna svåra att tyda, några direkta samband mellan effektförändring och täthet på sotningsintervall har ej kunnat ses. Därmed har beräkning för vinst i ECO ej kunnat göras.

4.6.5 Luftförvärmare

4.6.5.1 Sotningens påverkan

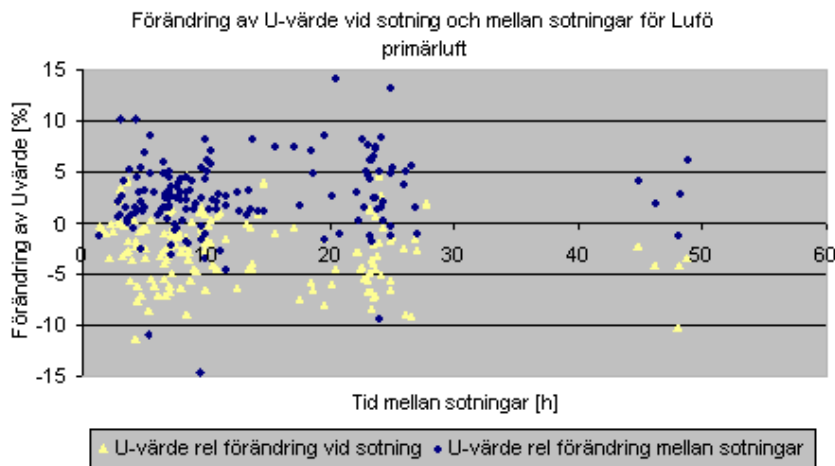
Vid sotningstillfället avlägsnas beläggningar vilket medför att värmeöverföringen stiger, då sotningen avslutats påbörjas beläggningstillväxten och värmeöverföringen avtar på nytt. Hur värmeöverföringen i ÖH2 påverkas vid sotningen samt vid olika täta sotningsintervall visas i Figur 4-28.

Driftdata har samlats in under en period på ett par dygn då sotning utfördes med olika sotningsintervall. För att få hög noggrannhet är mätvärdena insamlade var 10:e sekund. På primäraxeln visas värmeöverföring, på sekundäraxeln ses sotningsångans flöde. Värmeöverföringen varierar och tydliga samband mellan värmeöverföring och sotning är svår att se.

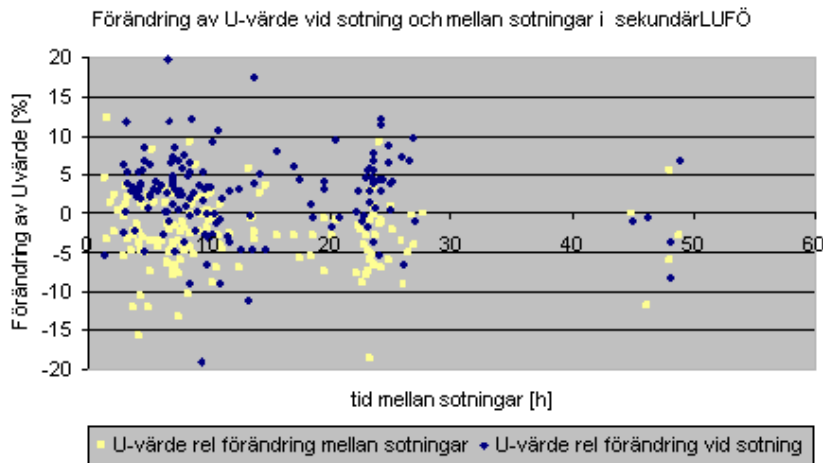


Figur 4-28: Förändring av U-värde i LUFÖ under ett dygn, värden insamlade var 10:e sekund

Nedan visas förändringen i värmeöverföring före och efter sotningstillfället och förändringen i värmeöverföring under tiden mellan sotningarna som en funktion av tiden mellan sotningarna. De ljusa punkterna visar förändringen i värmeöverföring vid sotningstillfället och de mörka punkterna visar förändringen mellan sotningstillfällena. Samtliga sotblåsare har fungerat och varit i drift under större delen av året. Värden för LUFÖprim visas i Figur 4-29 och värden för LUFÖsek visas i Figur 4-30.



Figur 4-29: Förändring i U-värde vid sotningar och mellan sotningar i primärluftförvärmare

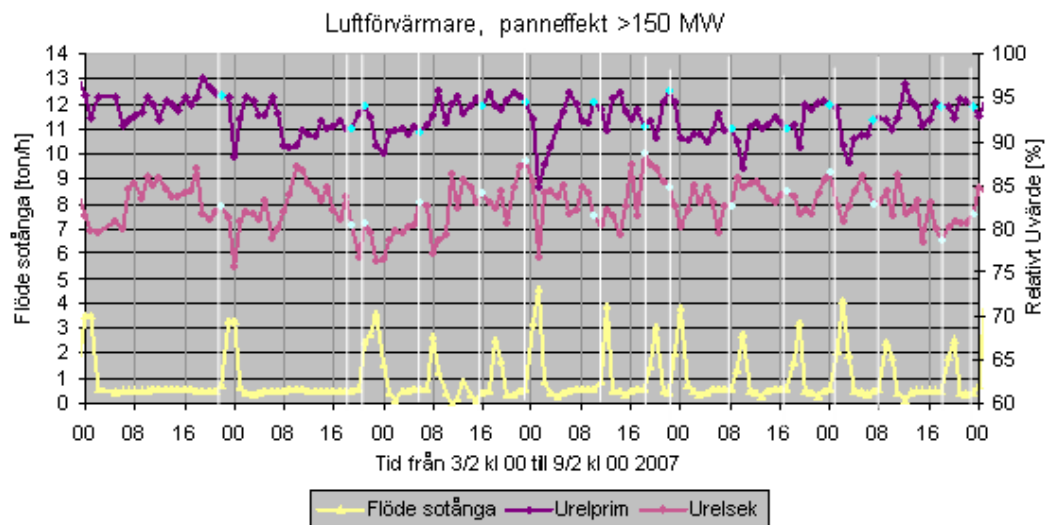


Figur 4-30: Förändring i U-värde vid sotningar och mellan sotningar i sekundärluftfövärmare

I luftfövärmarens båda delar är sotningsintervall kring 8h vanligare än de vid 24. Här syns att värmeöverföringen ökar mellan sotningarna och vid sotningstillfällena sker en minskning.

4.6.5.2 Vinst för olika sotningsintervall

En jämförelse mellan förändring i värmeöverföring och effekt vid sotningsintervall med 24 timmar respektive 8 timmars mellanrum visas i Figur 4-31. Primäraxeln visar flöde på sotningsånga och sekundäraxeln visar värmeöverföring. Tidpunkter då sotning sker i LUFÖ visas med vita linjer i figuren. Den övre kurvan visar värmeöverföring för LUFÖprim, kurvan i mitten visar värmeöverföring för LUFÖsek och längst ner visas sotningsångans flöde.



Figur 4-31: Värmeöverföring och effektförändring i LUFÖ från 3/2 till 9/2 2007

Trenderna för värmeöverföring i LUFÖ varierar mycket vilket gör det svårt att se tydliga resultat från olika sotningsintervall.

4.6.5.3 Diskussion, luftfövärmare

För LUFÖ är trenderna under perioden snarare ökande än minskande. Detta kan dels bero på att sotningsintervallen under perioden i dessa delar varit betydligt tätare, intervall kring 8 timmar har varit vanligast. Dels har den minskande värmeöverföringen i överhettarna lett till ökande rökgastemperaturer längre bak i rökgasstråket. I LUFÖ sker ingen mätning av effekten

i och med att luftförvärmaren ej bidrar till pannans effekt. Det är alltför stora variationer i trenderna för värmeöverföring i LUFÖ för att tydliga resultat från sotning med olika sotningsintervall ska kunna ses.

Sotning i LUFÖ och ECO har utförts med täta sotningsintervall under perioden för att sänka temperaturerna i rökgaserna innan slangfiltret efter luftförvärmaren samt för att minska risken för igensättning av mellanrummen mellan tubraderna. Slangfiltren kan skadas då temperaturerna är för höga.

5 Avslutande diskussion

I detta avsnitt analyseras resultaten i kapitlet innan, med fokus på hur värmeöverföringen påverkas utav sotningsintervallet, vilka felkällor som finns samt hur de påverkar resultaten.

5.1 Sotningsintervallets betydelse för värmeöverföringen

Högre temperaturer påverkar värmeöverföringen positivt. Vid jämförelse mellan rökgasernas temperatur och effektupptagningen i överhettarna, syns det att vid minskat effektupptaget i överhettarna ökar rökgastemperaturerna efter. Varmare rökgastemperaturer längre ned i rökgasstråket orsakas av minskad värmeöverföring i högre delar. Genom sotning kan värmeöverföringen förbättras och temperaturerna sänkas.

Vid sotningstillfället sker en ökning i effekt och värmeöverföring för överhettarna. Sotningens rengöringseffekt beror på tidsintervallet mellan sotningstillfällena. Sotningsintervallet har betydelse dels genom att minskningen mellan intervallen avtar vid sotningen och dels genom att minskningen avbryts kan nivån för värmeöverföring och effekt hållas på en högre nivå under en längre tidsperiod.

Vid längre intervall hinner mer beläggningar bildas på ytorna vilket ger större rengöring vid sotningen och sämre värmeöverföring under tiden mellan sotningarna. Täta sotningsintervall ger mindre förändring i värmeöverföring både under tiden mellan sotningarna och vid själva sotningstillfället. Vad som kunnat ses är att vid täta sotningsintervall är det möjligt att hålla värmeöverföring och effekt på en högre nivå i överhettarna än då sotning sker med längre intervall i och med att de avtagande trenderna som fås vid längre sotningsintervall avbryts.

För att kunna hålla ytorna helt fria från beläggningar behöver sotning ske med mycket små intervall i och med att tillväxten av beläggningar påbörjas direkt efter avslutad sotning. Alltför täta sotningsintervall är ej möjligt med ångsotning som sotningsmetod eftersom materialet inne i pannan då utsätts för stora risker för erosions- och korrosionsskador. Då sotning ej kan ske med tillräckligt täta sotningsintervall för att hålla ytorna helt fria från beläggningar sker en påbyggnad av beläggningar som blir alltför hårda för att avlägsnas av sotblåsarna. Detta leder till en försämrad värmeöverföring i takt med att beläggningarna byggs på. Trender för detta har visats för överhettarna.

Vinsten vid sotning är egentligen att minskningen av värmeöverföring minskar. Genom att effektupptaget i överhettarna kan hållas på en högre nivå då sotning sker med intervall på 8 timmar jämfört med 24 timmar, kan mer energi produceras. Detta syns tydligast i ÖH2 i och med att den är placerad överst i rökgasstråket och inte blir lika påverkad av hur sotningen sker i övriga paket. ÖH1 påverkas till exempel av hur värmeöverföringen sker i ÖH2.

Vid användning av sotningsintervall på 8 timmar istället för 24 timmar i överhettarna kan mellan 8 och 32 MWh mer produceras per dygn. Under periodens 219 dagar ger detta en ökning av energiproduktionen på 1700-7000 MWh, eller 500-2000 kkr. Kostnaden för att öka tätheten på sotningsintervallen i överhettarna är ungefär 300 kkr.

Beräkningarna ovan visar att det är lönsamt att öka sotningsintervallet i överhettarna. Men en ökning av sotningsintervallet leder även till ökade påfrestningar i materialet i tubrören, vilket innebär att en sådan ökning ska ske med försiktighet.

Vid tätare sotningsintervall i överhettarna kan temperaturerna på rökgaserna i ECO och LUFÖ vara lägre. Sotning för att minska rögastemperaturerna innan slangfiltret behöver då ej ske i samma utsträckning, vilket kan leda till att det inte behövs lika täta sotningsintervall i ECO och LUFÖ som i nuläget. Å andra sidan är det möjligt att vid mer frekvent sotning i överhettarna kan mer partiklar från rengöringen där följa med rökgaserna till ekonomiser och luftförvärmare och öka beläggningstillväxten så att tätare sotningsintervall behövs i ECO och LUFÖ.

5.1.1 Påverkan från ökat sotningsintervall

Användning av ångsotning medför påfrestningar för materialet i tubrören och kan öka risken för erosions- och korrosionsskador. Detta medför att alltför täta sotningsintervall ej kan användas då tubrören riskeras att skadas.

En möjlighet för att öka sotningsintervallet kan även vara att minska trycket på sotningsången vid sotning. En sådan minskning kan medföra sämre rengöringseffekt, men mer frekvent sotning kan även innebära att beläggningarna som bildas ej är lika hårda som vid längre sotningsintervall, och därmed kan avlägsnas även vid lägre ångtryck. Är detta möjligt skulle det även leda till minskad kostnad för ånga eftersom mindre sotningsånga åtgår vid sotningen.

Som ett alternativ/komplement till ångsotning kan akustisk sotning användas för att hålla ytorna rena. Vid akustisk sotning används mycket täta sotningsintervall, på detta vis kan andelen beläggningar som fäster vid ytan reduceras, vid behov av mer grundlig rengöring kan ångsotning användas. Detta skulle medföra mindre slitage på ytor och sotblåsare samt en mindre kostnad för sotningsånga, det som tillkommer är installationskostnad och underhåll av den akustiska sotningsutrustningen.

5.2 Felkällor

Det finns flera osäkerheter i resultaten som medför svårigheter i analys av resultaten.

- Förhållandena i pannan förändras ständigt och ett enskilt driftfall kommer sällan eller aldrig igen. Förändringarna i de mätningar som studeras här kan bero på en annorlunda bränslemix, eller att bränslets egenskaper är annorlunda nu än tidigare. Vilket inte är helt ovanligt då bibränslets egenskaper varierar. Värmeöverföringen kan påverkas även av vilken last pannan har samt rökgasernas temperaturer.

Detta medför att det är svårt att avgöra vilken effekt sotningen har på förändringen i värmeöverföring och vad som beror på att andra parametrar förändras.

- Något som även försvårat analyserna är att ett par av sotblåsarna varit trasiga under hela eller delar av den studerade perioden. Sotningen har därmed inte kunnat utföras som vanligt och rengöringen av ytorna skett mindre effektivt.
- Sotningsintervallen varierar stort under tidsperioden vilket visas i sotningsstatistiken ovan. Generellt sett sker färre sotningsintervall på 8 timmar än sotningsintervall kring 24 timmar i överhettarna, detta påverkar resultaten. I och med att antalet tillfällen med täta sotningsintervall är få, blir det osäkert om de trender som kan ses vid dessa tillfällen beror på sotningsintervallet eller orsakas av andra parametrar. I ekonomiser och luftförvärmarna råder motsatt förhållande, då sotningsintervall kring 8 timmar är vanligare i dessa delar.

- En osäkerhet är att tiderna för sotningens utförande är beräknade. Tidpunkten då sotblåsaren når inre och yttre gränsläge loggas, tidpunkten då sotblåsaren startar är okänd. Men hastigheten för sotblåsarens rörelse in och ut ur pannan är konstant antas tiden mellan start och inre gränsläge vara samma som tiden mellan inre och yttre gränsläge. Denna metod medför att sotningar då sotblåsaren fastnat på väg in i pannan eller gått extra trögt, kanske till följd av beläggningar inte noteras.
- Hur värmeöverföringsminskningen ser ut är olika för delarna, i och med att minskad värmeöverföring i ÖH2 leder till ökade rökgastemperaturer för delarna nedanför vilket i sin tur leder till att värmeöverföringen kan öka trots att beläggningen tillväxer på ytorna. Detta medför att det är svårt att se exakt hur beläggningen påverkar ytorna nedanför ÖH2. Beräkning av vinsten från sotning med olika täta sotningsintervall försvåras.

Möjliga felkällor:

- Ej helt jämförbar statistik, olika antal frekventa intervall, varierande antal timmar mellan sotningarna mm.
- Noggrannheten vid beräkningar av kostnaden för sotningsången.

6 Slutsatser

Tyngdpunkten i arbetet har lagts på att studera när, hur och var sotningen sker i pannan, vilka sotningsintervall som använts samt förbrukningen av sotningsånga vid sotningstillfällena. Då kunskap om detta behövs för att vidare analys av påverkan från sotningen och sotningsintervallen på värmeöverföring och effekt i pannans olika delar ska kunna göras. Vad som även skulle vara intressant är att studera hur olika bränsleblandningar påverkar värmeöverföringen i panna 5. Detta ligger utanför detta examensarbete men vore en intressant fortsättning.

De vanligaste sotningsintervallen i överhettarna har under perioden varit 24 timmars intervall vid ett par tillfällen har sotning skett med både mer och mindre täta intervall. I luftförvärmare och ekonomiser har de vanligaste sotningsintervallen varit 8 timmars intervall.

Vad som kunnat ses är att vid täta sotningsintervall är det möjligt att hålla värmeöverföring och effekt på en högre nivå i överhettarna än då sotning sker med längre intervall i och med att de avtagande trenderna som fås vid längre sotningsintervall avbryts. Vid täta intervall hinner inte beläggningen tillväxa i samma utsträckning som vid längre intervall. Då sotning precis inträffat sker en höjning i effekt och värmeöverföring. Efter en tid minskar effekten på nytt i takt med att nya beläggningar bildas. Genom att sotningen sker med tätare intervall hinner effekten inte minska lika mycket mellan sotningarna och bättre effekt fås. De lägre dipparna undviks, denna förändring kan även bero på andra förändringar än sotningen, men variationen under en så kort period är rimligen liten.

Vid användning av sotningsintervall på 8 timmar istället för 24 timmar i överhettarna skulle igenomsnitt 16 MWh mer produceras per dygn. Under periodens 219 dagar ger detta en ökning av energiproduktionen på 3500 MWh, eller 900 kkr. Kostnaden för att öka tätheten på sotningsintervallen i överhettarna är ungefär 300 kkr.

För att kunna avgöra vilket sotningsintervall som är optimalt i pannans olika delar bör mer studier göras. De trender som har kunnat ses är att täta sotningsintervall medför att mer värmeöverföring i överhettarna och mindre effekt minskning. I luftförvärmare och ekonomiser är trenderna inte lika tydliga. De har under den studerade perioden sotats med relativt täta intervall och ytterligare minskning av intervallen i dessa delar ger troligen ingen större vinst utan snarare en större kostnad i förbrukning av sotningsånga.

Sotningsintervall på 8h medför ökade kostnader i sotningsånga, men då dessa relateras till de möjliga vinsterna bör en minskning i sotningsintervall kunna anses lönsam. Innan sotningsfrekvensen ökar bör den påfrestning detta innebär för materialet i tubrören undersökas. Vid behov kan skydd för de tubrör som utsätts mest installeras.

- Slutsatsen är att det är lönsamt med ett tätare sotningsintervall i överhettarna såvida det inte leder till ökat slitage av ytorna i pannan. I och med att effektuttaget och värmeöverföringen kan hållas på en högre nivå under en längre tidsperiod.

6.1.1 Förslag på fortsättning

Som förslag på fortsättning föreslås följande:

- Utför sotning med 8 timmars sotningsintervall i överhettarna för att under en längre period kunna se hur trenden på värmeöverföringen förändras jämfört med perioder då sotningsintervallen är kring 24 timmar.

- Utvärdera hur tätare sotningsintervall kan påverka slitage i överhettarna, hur påverkas erosions- samt korrosionspåfrestningar i materialet då sotning sker med tätare intervall.
- Sota under samma period ECO och LUFÖ med sotningsintervall på 8 timmar för att avgöra överhettarnas påverkan på värmeöverföringen i de nedre delarna.
- Studera hur bränsleblandningen påverkar värmeöverföring och beläggingsbildning. Medför en viss bränslemix ökad eller minskad sotning?
- Utvärdera möjligheten till att använda akustisk sotning som komplement till den befintliga ångsotningen.
- Mät och logga tidpunkten för sotningssekvensens start. Detta medför att mer exakta beräkningar för sotningstider och därmed även förbrukningar skulle kunna erhållas.
- Studera även andra parametrar som kan ha betydelse för sotblåsningens effektivitet, som dysornas vinklar eller sotblåsarens hastighet.
- Genomför sotningstestet som beskrivs ovan vid mer jämna förhållanden i pannans drift, för att få tydligt resultat.
- Om tätare sotningsintervall leder till ett för stort slitage på ytor inne i pannan, kan lägre tryck på sotningsången vara önskvärt. Det blir då intressant att undersöka dysöppningens vidd för att erhålla ett önskvärt tryck och spridning på ången. Att använda sotningssekvenser med färre sotblåsare så att varannan gång sotas hälften av sotblåsarna kan även minska slitaget på pannans ytor.

7 Referenser

7.1.1 Tryckta referenser

Alvarez H, *Energiteknik del 1 &2*, 2003, Studentlitteratur, Lund

Axby F. m.fl., *Mer El! Metodisk genomgång av befintliga anläggningar*, 2006, Värmeforskrapport nr 985

Boyle G, *Renewable energy- power for a sustainable future, second edition* 2004, (Chapter on bioenergy by: Stephen Larkin, Janet Ramage and Jonathan Scurlock)

Eklund A. & Rodin Å, *Sotningsmetodernas effektivitet och konsekvenser på förbränningsanläggningar för olika typer av bränslen*, 2004, Värmeforskrapport nr 878.

Eriksson T., *Driftrelaterad direktmätning av lågtemperaturkorrosion i en bränsleeldad kraftvärmelanläggning*, 2000, Värmeforskrapport nr 691

Eskilsson D. & Samuelsson J., *Anläggningars behov av ny kontinuerlig mätteknik*, 2006, Värmeforskrapport nr 984

Gestlöf B. *Beläggningsmätning med mätsond i biobränslepanna*, 2004, examensarbete Mälardalens högskola Västerås

Gustavsson L. & Nyquist G., *Värmeforsks mätteknik – utgåva 3*, 2005

Henderson P. m.fl., *Kunskapsläget beträffande högttemperaturkorrosion i ångpannor för biobränsle och avfall*, 2006, Värmeforskrapport nr 992

Hjörnhede A. & Henderson P., *Sotningens inverkan på materialförluster i bio- och avfallseldade pannor*, 2006, Värmeforskrapport nr 970

Kjörk A., *Behovsstyrd sotblåsning för bio- och avfallseldade pannor – inventering och teknikval*, 2003, Värmeforskrapport nr 841

Kvarnström J., Botzauer E. & Dahlquist E., *Produktions- och distributionsplanering av fjärrvärme*, 2006, Värmeforskrapport nr 990

Nordin A. & Levén P., *Sammanställning av svenska driftiserfarenheter*, 1997, Värmeforskrapport nr 607

Skaardal R., *Utvärdering av sotningsmetoder*, 1984, Värmeforskrapport nr 176

Strömberg B., *Bränslehandboken*, 2005, Värmeforskrapport nr 911, huvudrapport, Miljö- och förbränningsteknik,

Wester L., *Ångpannor reservutgåva hösten 1991*, sammanställt av Lars Wester, Mälardalenshögskola, Västerås.

Widarsson B., *Beräkning av värmeöverföringstal på överhettarytor i Mälarenergi panna 5*, 2004, Mälardalenshögskola, Västerås

7.1.2 Muntliga referenser

Holmén Erik, löpande intervjuer under arbetets gång, *våren 2007*

Ölvebo Fredrik, löpande intervjuer under arbetets gång, *våren 2007*

7.1.3 Elektroniska referenser

Clyde Bergemann, 2007, (Sotningsutrustning)

http://www.clydebergemann.de/content_manager/go/ID/19397/dbc/320f38a9de21b9317ecc3a86c5e2c184

IEA Bioenergy, International colaboration in bioenergy, 2007, <http://www.ieabioenergy.com>

R.Olsson, *Fakta om biobränsle*, 2003 (SLU-BTK, INFO från projekt et 10) bioenergi från skogsprodukter. <http://publikationer.slu.se/Filer/INFO-10.pdf> (juni 2007-06-19)

Statens energimyndighet, www.energimyndigheten.se (Energiläget 2006)

Svebio, Svenska Bioenergiföreningen, 2007, www.svebio.se

Bilagor

Bilaga A Samband för värmeöverföring

Värmeöverföring sker genom värmeledning, värmekonvektion samt genom värmestrålning. Vanligen är värmeöverföring mellan två material eller medier en kombination av ledning, konvektion och strålning (Alvarez, 2003).

A.1 Värmeledning

Värmeledning beskriver hur värme leds genom ett material, som ett mått på materialets värmeledningsförmåga används värmekonduktiviteten, λ , [W/mK]. Värmeledningen varierar med temperatur och avstånd, detta medför att ett material kan ha varierande värmekonduktivitet beroende på tjocklek och rådande temperatur. För att beskriva värmeledning genom en vägg eller yta bestående av flera material vägs värmekonduktiviteten för varje enskilt material ihop med dess tjocklek. Detta visas i Ekvation (A-1)

, där tvärsnittet består av n stycken material med tjockleken δ och värmekonduktiviteten λ .

$$P = A * \left(\frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \right) \quad \text{Ekvation (A-1)}$$

I en överhettare består vanligen tubrören av ett homogentmaterial, men utanpå tubrören bildas beläggningar som påverkar värmeöverföringen. Beroende på vilka material som förenas och bildar beläggningarna påverkas värmeöverföringen olika. Ekvation (A-2) visar värmeledningen genom en cirkulär yta med arean A . Där L är rörets längd, r_{i+1} är yttre radien av material i och r_i är den inre radien.

$$P = 2 * \pi * L * \left(\frac{t_i - t_{n+i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} * \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \right) \quad \text{Ekvation (A-2)}$$

A.2 Värmekonvektion

Värmekonvektion beskriver hur värme överförs mellan fast yta och fluid. Värmeöverföring från en varm yta till en fluid med lägre temperatur sker genom att partiklarna i fluiden som befinner sig närmast ytan tar upp värme. De uppvärmda partiklarna värmer upp partiklar i närheten, på så sätt blir fluiden uppvärmd. Temperaturen i fluiden är beroende av avståndet till den varma ytan. För att beskriva hur effektivt värmeöverföringen sker används värmeövergångskoefficienten U eller α [W/m²K], sambandet visas i Ekvation (A-6) (Alvarez, 2003).

$$N_u = 1,86 * \left(R_e * P_r * \frac{d_h}{L} \right)^{1/3} * \left(\frac{\eta_f}{\eta_v} \right)^{0,14} \quad \text{Ekvation (A-3)}$$

För turbulent strömning gäller sambanden i Ekvation (A-4) enligt Hausen då $2300 < R_e < 10^6$ och $0,6 < P_r < 500$.

$$N_u = 1,86 * \left(R_e * P_r * \frac{d_h}{L} \right)^{1/3} * \left(\frac{\eta_f}{\eta_v} \right)^{0,14} \quad \text{Ekvation (A-4)}$$

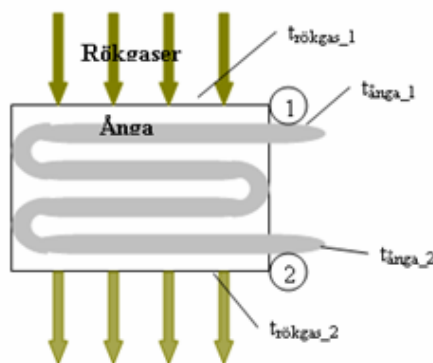
Värmekonvektion sker huvudsakligen i de värmeöverförande ytorna som är placerade i pannornas rökgasstråk. Där är det kallare mediet antingen överhettad ånga, matarvatten eller

förbränningsluft. För överhettade vattenångor i kanaler där väggtemperaturen ligger över kondensationsgränsen gäller samband i Ekvation (A-5) för värmeövergångskoefficienten.

$$U = 12 * (c * \rho)^{0,79} * \left(\frac{0,02}{d_h} \right)^{0,16} \quad \text{Ekvation (A-5)}$$

Då strömningshastigheten ökar, så ökar även U, vilket medför att värmeöverföringen ökar då hastigheten på fluiden ökar.

Riktningen på rökgasernas flöde är här uppifrån och ner, utifrån det kan riktning på ångans flöde väljas. Antingen tillförs ångan genom (1), flödet blir då riktat medströms rökgaserna, eller så kan motströmsflöde väljas då tillförs ångan genom (2). Beroende på hur flödet på ångan är riktat i förhållande till rökgasernas flöde i en värmeväxlare används benämningarna motströmsrespektive medströmsvärmeväxlare.



Figur (A-1): Skiss över värmeöverföringen från rökgaser till ånga

I Ekvation (A-6) används för värmeväxlare(överhettare) den logaritmiska medeltemperatur-differensen(\mathcal{G}_m) istället för $(t_{vägg} - t_{fluid})$.

$$P = U * A * (t_{vägg} - t_{fluid}) \quad \text{Ekvation (A-6)}$$

I Ekvation (A-7) nedan beskrivs \mathcal{G}_m närmare, tvärsnitt (1) och (2) visas i Figur (A-1) ovan, där ses en skiss på en tubrörsslinga i ett värmeöverförande paket.

$$\mathcal{G}_m = \left(\frac{(t_{rökgas_1} - t_{ånga_1}) - (t_{rökgas_2} - t_{ånga_2})}{\ln \left(\frac{t_{rökgas_1} - t_{ånga_1}}{t_{rökgas_2} - t_{ånga_2}} \right)} \right) \quad \text{Ekvation (A-7)}$$

Medströmsriktat ångflöde medför att ångan som ska värmas förs in i pannan vid tvärsnitt (1) där rökgaserna är som varmast. Temperaturskillnad mellan ånga och rökgas är större än vid ett mot- strömsriktat flöde på ångan. Vid motströmsriktat ångflöde förs den kalla ångan in i pannan vid (2) och möter därmed svalare rökgaser än vid (1). Uppvärmningen sker mer långsamt i motströms- överhettare än i medströms.

Värmeöverföringen i en motströmsvärmeväxlare blir mer skonsamt mot materialet i tuberna och med att temperaturskillnaderna blir mindre. Genom att temperaturerna på rökgaser ökar samtidigt som ångan i tuberna värms kan mer värme överföras per ångenhet vid motströmsriktat ångflöde. Uppvärmningen sker inte lika snabbt vid motströmsångflöde som vid medströmsångflöde, men ångan upphettas till en viss temperatur på mindre yta i ett motströmsångflöde (Kjörk m.fl., 2003).

För att kyla materialet i tuberna kan medströmsriktat ångflöde väljas genom att temperaturskillnaden mellan rökgaser och ånga är stor så får ångan en kylande effekt på tubrören. I de överhettare som är placerade närmast eldstaden väljs vanligen medströmsriktat ångflöde för att minska materialtemperaturerna i tubrören. I överhettare längre bak i rökgasstråket väljs vanligen motströmsriktade överhettare för att få ut så mycket värme som möjligt (Kjörk m.fl., 2003).

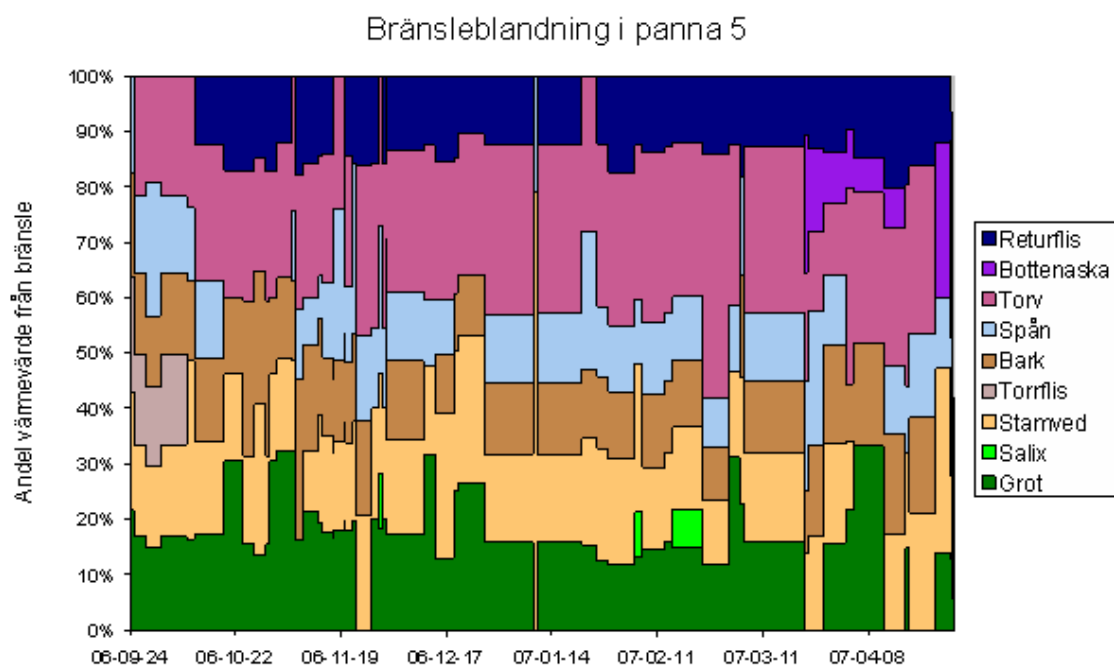
A.3 Värmestrålning

Vid förbränningen sker värmestrålning från ytor i eldstaden och delar av bränslen som glöder. Även efter eldstaden kan strålning ske genom flammor och ofullständigt utbrända partiklar. Att beskriva de samband och inverkan som ger strålning är ofta komplicerat och invecklat. Vanligen används empiriska erfarenheter för att få ungefärliga koefficienter och approximerade beskrivningar av förhållanden.

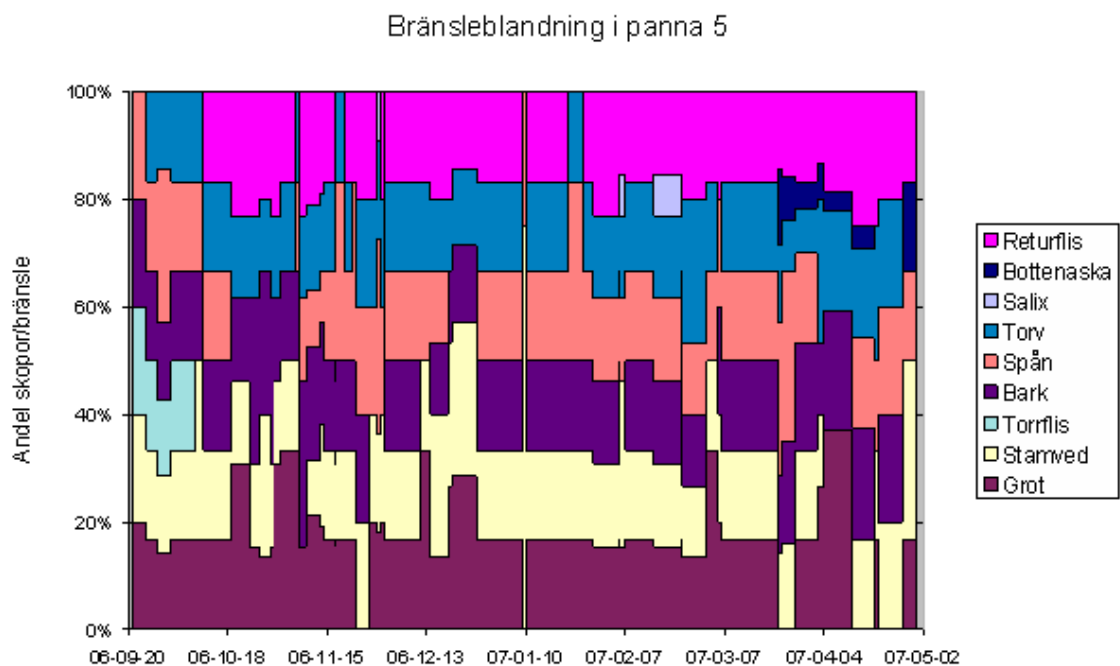
Värmestrålning ökar med fjärdepotensen av den absoluta temperaturen vilket medför att den ökar snabbt vid stigande temperaturer.

Bilaga B Bränslestatistik i panna 5

I Figur (B-1): Bränsleblandning i panna 5. visas hur bränslena varierat under året andelen värmevärde som kommer från olika bränslen.



Figur (B-1): Bränsleblandning i panna 5.



Figur (B-2): Andel skopor av bränslen i panna 5

Bilaga C Sotningsstatistik

I denna bilaga visas statistik för sotningsintervall i pannans delar och de olika sotblåsarna. I Tabell (C-1) visas förbrukning vid sotning i pannans delar. I Tabell (C-2) visas en jämförelse av kostnad för uppvärmning vid olika sotningsintervall. I Tabell (C-3) visas kostnad och förbrukning vid sotning i pannans delar. Mer statistik visas nedan för de olika värmeöverförande delarna.

Tabell (C-1): Beräknad sotning i panna 5 under perioden om samtliga sotblåsare hade använts.

	ÖH2	ÖH1	MÖH1	ECO	LUFÖ	Totalt
Antal sotningar	179	180	163	298	295	1115
Ångförbrukning [ton]	130,0	136,6	176,0	299,5	545,8	1 288,0
Tid [h: min: sek]	37: 41:22	39: 36: 00	51: 01: 08	86: 50:02	158:14:05	354:22:37

Tabell (C-2): Jämförelse av uppvärmnings kostnad vid olika sotningsintervall

Sotningsintervall	Antal sotningar	Förbrukning av ånga	Kostnad för ånga
8 timmar	657	344 ton	49 k kr
16 timmar	329	172 ton	25 k kr
24 timmar	219	115 ton	16 k kr
48 timmar	110	57 ton	8 k kr

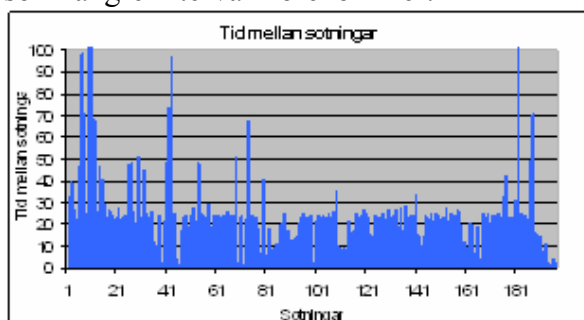
Tabell (C-3): Kostnad för sotningsånga vid olika sotningsintervall

	ÖH2	ÖH1	MÖH1	ECO	LUFÖ	Totalt
48 timmars intervall						
ton	79	83	118	110	203	574
MWh	73	76	108	101	185	524
kkkr	22	23	32	30	56	157
24 timmars intervall						
ton	159	166	237	220	405	1 146
MWh	145	152	216	201	370	1 049
kkkr	44	46	65	60	111	315
16 timmars intervall						
ton	239	249	355	330	608	1 722
MWh	218	228	324	302	556	1 573
kkkr	65	68	97	91	167	472
8 timmars intervall						
ton	477	499	709	660	1 216	3 443
MWh	436	456	648	604	1 110	3 147
kkkr	131	137	195	181	333	944

C.1 Sotning i överhettare 2

Sotningen i överhettare 2 har under den studerade tidsperioden skett ungefär en gång per dygn, både längre och täta intervall har förekommit. Sotblåsare 1 har varit trasig en större del av året. Den vanligaste förekommande sotningen när 3 sotblåsare används, 10 % av sotningarna har alla fyra sotblåsare i ÖH2 använts vid en sotning. Detta medför att sotningen och förbrukningen av sotningsånga ej skett normalt. Tiden mellan utförda sotningar i ÖH2

varierar under perioden. Vanligaste sotningsintervallet är ungefär 24 timmar, men tätare såväl som längre intervall förekommer.



Figur (C-1) Tid mellan sotningar i ÖH2

I Tabell (C-4) visas statistik för sotblåsarna i ÖH2. De genomsnittliga tider det tar för sotblåsare i ÖH2 att genomföra en sotning, total ångförbrukning, tid för sotning samt antal sotningar under perioden visas. Genomsnittstiden för en sotning i ÖH2 är 3 minuter och 9 sekunder.

Tabell (C-4): Sotningsstatistik för sotblåsarna i ÖH2

Överhettare 2	Sotblåsare 1	Sotblåsare 2	Sotblåsare 3	Sotblåsare 4
Medel tid/sotning	3 min 8sek	3 min 11sek	3 min 10sek	3 min 9sek
Total sotningstid	1h 28min 22sek	9h 30min 4sek	9h 31min 7sek	10h13min25sek
Total ångförbrukning	5,1 ton	32,8 ton	32,8 ton	35,3 ton
Totalt antal sotningar	27	178	179	176

Sotblåsare 1 har under perioden utfört 27 stycken sotningar, hade sotblåsare 1 varit hel under hela perioden är det troligt att antalet sotningar kunnat vara 178 stycken. Samtliga sotblåsare har ej varit aktiverade under alla sotningstillfällen, i vissa fall har endast två sotblåsare valts. Under perioden har 106 ton sotningsånga förbrukats, hade samtliga sotblåsare aktiverats vid dessa tillfällen blir förbrukningen istället 130 ton. Total tid för sotning och förbrukning av sotningsånga i ÖH2 visas i Tabell (C-5).

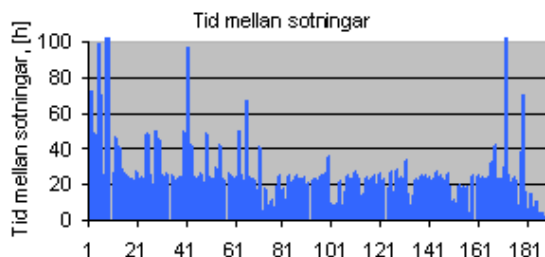
Tabell (C-5): Statistik för sotning i hela ÖH2

Överhettare 2	Alla sotblåsare	Total
Ångförbrukning [ton]	0,73	106,0
Sotningstid	12 min 40 sek	30 h 42 min 58 sek

C.2 Sotning i överhettare 1

Sotblåsarna i överhettare 1 och 2 är av samma antal och modell, detta medför att statistiken för sotningarna ser liknande ut för de båda värmeöverförande paketen. Sotblåsare 7 har ej fungerat helt under perioden. I överhettare 1 har 43 sotningar utförts utav sotblåsare 7, jämfört med 180stycken i sotblåsare 5. Den vanligaste förekommande sotningen när de resterande 3 sotblåsarna används.

Sotningsintervallen i överhettare 1 varierar under perioden, vilket visas i Figur (C-2). Som kan ses är det vanligast med sotningsintervall på ungefär 24 timmar. Men både längre och tätare intervall förekommer. I Tabell (C-6) visas statistik för sotblåsarna i överhettare 1.



Figur (C-2): Tid mellan sotningar i ÖH1

Tabell (C-6): Sotningsstatistik för sotblåsarna i ÖH1

Överhettare 1	Sotblåsare 5	Sotblåsare 6	Sotblåsare 7	Sotblåsare 8
Medel tid/sotning	3min 10sek	3min 20sek	3min 31sek	3min 11sek
Total sotningstid	9h 34min 58sek	9h 15min 48sek	4h 20min 17sek	9h 35min 38sek
Total ångförbrukning	33,1 ton	31,9 ton	15,0 ton	33,1 ton
Totalt antal sotningar	180	167	43	175

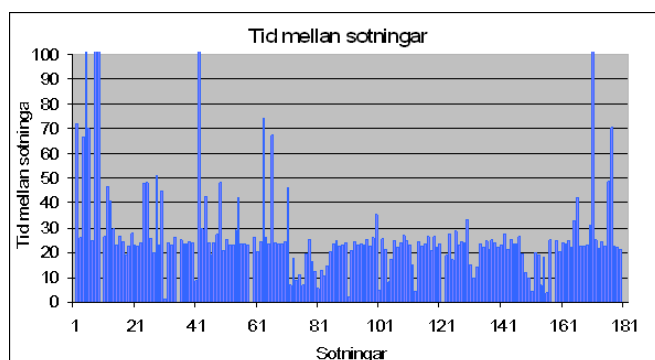
Genomsnittstiden för en sotning är drygt 3 minuter. De genomsnittliga tider det tar för en sotblåsare i ÖH1 att genomföra en sotning visas. Samt total ångförbrukning, tid för sotning och antal sotningar under perioden. Totalt har 113 ton ånga förbrukats under perioden. Om samtliga sotblåsare varit aktiva vid varje sotning skulle närmare 137 ton ånga förbrukats under perioden. Total tid för sotning och total förbrukning av sotningsånga i överhettare 1 visas nedan.

Tabell (C-7): Statistik för sotning i hela ÖH1

Överhettare 1	Alla sotblåsare	Total
Ångförbrukning [ton]	0,76	113,1
Sotningstid	12min 40sek	32h 46min 41sek

C.3 Sotning i mellanöverhettare 1

I mellanöverhettare 1 finns 6 stycken sotblåsare, nummer 9 till 14. Sotblåsare 9 ej fungerat under perioden. Sotningsintervallen i mellanöverhettare 1 varierar under perioden, vilket visas i Figur (C-3) nedan. Som kan ses är det vanligast med sotningsintervall på ungefär 24 timmar. Men både längre och tätare intervall förekommer.



Figur (C-3): Tid mellan sotningar i MÖH1

I Tabell (C-8) visas statistik för genomsnittlig tid för sotblåsare i MÖH1 att genomföra en sotning. Även total ångförbrukning, tid för sotning och antal sotningar under perioden visas. Genomsnittstiden för en sotning är ungefär 3 minuter.

Tabell (C-8): Sotningsstatistik för sotblåsare 9 till 14 i MÖH1

Mellanöverhettare 1	Sotblåsare 9	Sotblåsare 10	Sotblåsare 11
Medel tid/sotning	0 min 0sek	3min 3sek	3min 9sek
Total sotningstid	0 h 0min 0sek	9h 19min 22sek	13h 21min 33sek
Total ångförbrukning [ton]	0,0	32,2	46,1
Totalt antal sotningar	0	162	157

	Sotblåsare 12	Sotblåsare 13	Sotblåsare 14
Medel tid/sotning	3min 9sek	3min 8sek	3min 10sek
Total sotningstid	8h 34min 20sek	8h 12min 2sek	8h 32min 14sek
Total ångförbrukning [ton]	29,6	28,3	29,4
Totalt antal sotningar	163	157	162

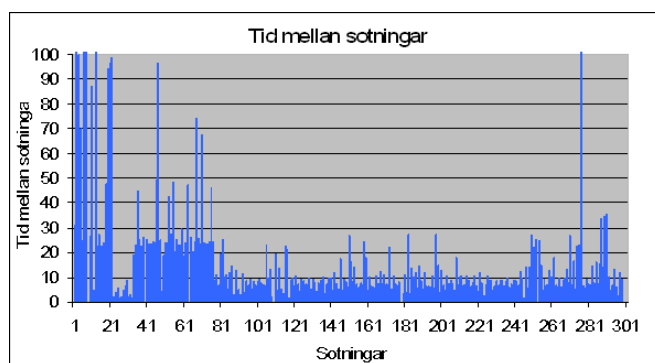
Totalt har 165,6 ton ånga förbrukats under perioden. Om samtliga sotblåsare varit aktiva vid varje sotning skulle närmare 176 ton ånga ha förbrukats under perioden. Total tid för sotning och förbrukning av sotningsånga i mellanöverhettare 1 visas i Tabell (C-9) nedan.

Tabell (C-9): Statistik för sotning i hela MÖH1

Mellanöverhettare 1	Alla sotblåsare	Total
Ångförbrukning [ton]	1,1	165,6
Sotningstid	18 min 48 sek	47 h 59 min 31 sek

C.4 Sotning i ekonomiser

I ekonomiser delen finns 8 sotblåsare, nummer 15 till 22. Sotblåsare 19 har ej fungerat helt under perioden. Sotningsintervallen i ekonomiser varierar under perioden, vilket visas i Figur (C-4) nedan. Som kan ses är det vanligast med sotningsintervall på något under 10 timmar, både längre och tätare intervall förekommer.



Figur (C-4): Tid mellan sotningar i ECO

I Tabell (C-10) visas statistik för sotblåsarna i ekonomiser. De genomsnittliga tider det tar för en sotblåsare i ECO att genomföra en sotning visas. Samt total ångförbrukning, tid för sotning och antal sotningar under perioden. Genomsnittstiden för en sotning är drygt 2 minuter.

Tabell (C-10): Sotningsstatistik för sotblåsare 15 till 22 i ECO

Ekonomiser	Sotblåsare 15	Sotblåsare 16	Sotblåsare 17	Sotblåsare 18
Medel tid/sotning	2 min 12sek	2 min 11sek	2 min 10sek	2 min 11 sek
Total sotningstid	11h 0min 54sek	10h 52min 10sek	10h 43min 47sek	9h 21min 0sek
Total ångförbrukning	38,0 ton	37,5 ton	37,0 ton	32,3 ton
Totalt antal sotningar	298	287	294	257
	Sotblåsare 19	Sotblåsare 20	Sotblåsare 21	Sotblåsare 22
Medel tid/sotning	2 min 10 sek	2 min 10 sek	2 min 12 sek	2 min 13 sek
Total sotningstid	4h 11min 35sek	10 h 34min 14sek	10 h 52min 44sek	11 h 7min 48sek
Total ångförbrukning	14,5 ton	36,5 ton	37,5 ton	38,4 ton
Totalt antal sotningar	106	293	297	297

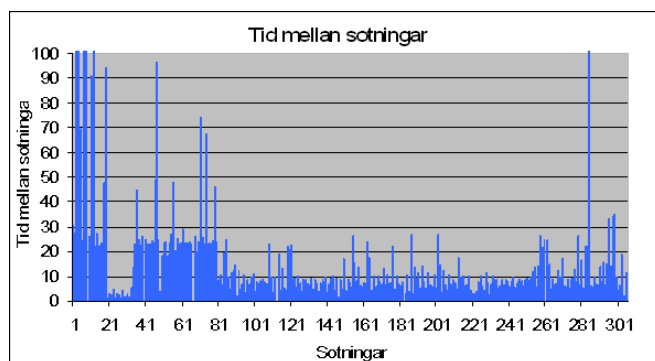
Totalt har 195,7 ton ånga förbrukats under perioden. Om samtliga sotblåsare varit aktiva vid varje sotning skulle närmare 300 ton ånga ha förbrukats under perioden. Total tid för sotning och förbrukning av sotningsånga i ekonomiser visas i Tabell (C-11) nedan.

Tabell (C-11): Statistik för sotning i hela ECO

Ekonomiser	Alla sotblåsare	Total
Ångförbrukning [ton]	1,0	195,7
Sotningstid	17 min 28 sek	78 h 44 min 13 sek

C.5 Sotning i luftförvärmare

I luftförvärmarna finns 10 stycken sotblåsare, nummer 23 till 32. Sotningsintervallen i luftförvärmare varierar under perioden, vilket visas i Figur (C-5) nedan. Som kan ses är det vanligast med sotningsintervall på något under 10 timmar. Men både längre och tätare intervall förekommer.



Figur (C-5): Tid mellan sotningar i LUFÖ

I Tabell (C-12) visas statistik för sotblåsarna i luftfövärmaren. De genomsnittliga tider det tar för en sotblåsare i LUFÖ att genomföra en sotning visas. Samt total ångförbrukning, tid för sotning och antal sotningar under perioden. Genomsnittstiden för en sotning är ungefär 3 minuter.

Tabell (C-12): Sotningsstatistik för sotblåsare 23 till 26 i LUFÖ

Luftfövärmare	Sotblåsare 23	Sotblåsare 24	Sotblåsare 25	Sotblåsare 26
Medel tid/sotning	3min 10 sek	3min 7sek	3min 8 sek	3min 11sek
Total sotningstid	7h 59min 29sek	15h 29min19sek	19h 30min20sek	22h 41min36sek
Total ångförbrukning	27,6 ton	53,4 ton	67,3 ton	78,3 ton
Totalt antal sotningar	280	295	271	282
	Sotblåsare 27	Sotblåsare 28	Sotblåsare 29	Sotblåsare 30
Medel tid/sotning	3min 17sek	3min 13 sek	3min 18 sek	3min 14 sek
Total sotningstid	15 h 3min 54sek	15h 7min 14sek	13h 4min 34sek	14h 31min40sek
Total ångförbrukning	52,0 ton	52,2 ton	45,1 ton	50,1 ton
Totalt antal sotningar	275	278	227	270
	Sotblåsare 31	Sotblåsare 32		
Medel tid/sotning	3min 15 sek	3min 18 sek		
Total sotningstid	15h 2min 24sek	25h 38min41sek		
Total ångförbrukning	51,9 ton	88,5 ton		
Totalt antal sotningar	278	263		

Totalt har 566 ton ånga förbrukats under perioden. Om samtliga sotblåsare varit aktiva vid varje sotning skulle närmare 546 ånga ha förbrukats under perioden. Anledningen till att den totala förbrukningen av ånga under perioden är hög är att sotblåsare 26 har ovanligt hög förbrukning. Total tid för sotning och förbrukning av sotningsånga i luftfövärmarna visas i Tabell (C-13).

Tabell (C-13): Statistik för sotning i hela LUFÖ

Luftfövärmare	Alla sotblåsare	Total
Ångförbrukning [ton]	1,85	566,2
Sotningstid	32 min 4 sek	188 h 9 min 10 sek

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.et.slu.se

SLU
Department of Energy and Technology
Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000
